



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**PARAMETRISEN SUUNNITTELUN
HYÖDYNTÄMINEN TERÄSBETONISTEN
RUNKORAKENTEIDEN
LUONNOSSUUNNITTELUSSA**

Paavo Vähänen

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka

Diplomityö

Toukokuu 2019

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan maisteriohjelma		Pääaineopinnojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Vähänen, Paavo		Työn ohjaaja yliopistolla Niemi, Antti H., TkT, dosentti	
Työn nimi Parametrisen suunnittelun hyödyntäminen teräsbetonisten runkorakenteiden luonnossuunnittelussa			
Opintosuunta Rakennesuunnittelu ja rakentamisteknologia	Työn laji Diplomityö	Aika Toukokuu 2019	Sivumäärä 84s.
Tiivistelmä <p>Parametrinen suunnittelu on osa algoritmiavusteista suunnittelua, jossa sarja ennalta määrättyjä tehtäviä suorittavat laskennan reunaehtojen ja lähtöparametrien avulla. Diplomityön tavoitteena on ollut luoda pohja parametrisen suunnittelun hyödyntämiselle betonirakenteiden runkojen luonnossuunnittelussa. Työssä tutkitaan, miten parametristä suunnittelua voitaisiin hyödyntää rakennushankkeen luonnossuunnitteluvaiheessa eri runkojärjestelmien vertailussa sekä alustavien rakenneosien ja perustuskuormien mitoittamisessa.</p> <p>Työn teoriaosuudessa käsitellään betonirakenteisen rakennuksen rungon luonnossuunnitteluun liittyviä seikkoja. Rakennuksen oleellisin osa on rakennuksen runko sekä jäykistysjärjestelmä. Työssä esitellään eri runko- ja jäykistysjärjestelmiä sekä luonnossuunnittelun osavaiheita. Lisäksi avataan parametristä suunnittelua käsitteenä, sekä esitellään tutkimusosuudessa käytettäviä ohjelmistoja ja mielenkiintoisia sovellutuksia rakennesuunnittelussa.</p> <p>Kirjallisuusosuudessa määriteltujen ominaisuuksien perusteella luodaan visuaalisella ohjelmoinnilla laskentapohja parametrisen mallin luontiin. Tutkimusosiossa sovelletaan työssä luotua laskentapohjaa käynnissä olevaan luonnossuunnitteluhankkeeseen. Osiossa vertaillaan kahden eri luonnossuunnitteluprosessin tuloksia, perinteisen suunnitteluprosessin ja parametrisen suunnittelun. Laskentapohja mahdollistaa nopean rakenteiden alustavan mitoituksen sekä perustuskuormien karkean määrittelemisen luonnossuunnitteluvaiheessa. Laskentapohja esivalitsee laskentatuloksista soveltuvat rakenteiden dimensiot laskentamalliin poistaen käyttäjältä työlään poikkileikkausten iteroinnin manuaalisesti laskentatuloksista. Lisäksi laskentapohjan luoma parametrinen malli voidaan linkittää Teklaan sekä laskentaohjelmiin kuten RFEMiin.</p> <p>Parametrinen suunnittelu on mielenkiintoinen lisä rakennesuunnittelijan työkaluihin. Työn perusteella saatiin hyvä kuva parametrisen suunnittelun mahdollisuuksista ja menetelmistä, joita voidaan jatkossa soveltaa luonnossuunnittelun ohella muihin suunnittelutarpeisiin. Parametrisellä suunnittelulla on paljon potentiaalia, jota ei vielä täysin ole hyödynnetty rakennesuunnittelussa. Alan ohjelmistot kehittyvät kovaa vauhtia, samalla kun tieto ja osaaminen aihealueesta laajenevat. Parametriset suunnittelumenetelmät ovat sekä tämän hetken, että tulevaisuuden suunnittelijoiden työkaluja.</p>			
Muita tietoja			

ABSTRACT

FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Master's Programme in Civil Engineering		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Vähänen, Paavo		Thesis Supervisor Niemi, Antti H., D.Sc (Tech.), docent	
Title of Thesis Utilization of parametric design in drafting concrete structural systems			
Major Subject Civil Engineering	Type of Thesis Master's thesis	Submission Date May 2019	Number of Pages 84 p.
<p>Abstract</p> <p>Parametric design is a subset of algorithmic design, in which a series of tasks that are previously designated process calculations based on boundary conditions and input parameters. The objective of this thesis has been to create a basis for using parametric design in drafting structural systems made of concrete. The main idea is to find out how parametric design can be utilized in civil engineering when comparing structural systems and dimensioning the initial structural elements and the foundation load.</p> <p>The theory part of this thesis focuses on matters concerning drafting a concrete structural system. The most essential parts of a building are the structural and the reinforcing systems. The thesis showcases some structural and reinforcing systems and stages of the civil engineering procedure. In addition parametric design is defined as a concept, and the software used in the research part and some interesting applications in structural engineering are demonstrated.</p> <p>Features specified in the theory part are used in the creating of the calculation layout for parametric model. In the second phase of the work, the created calculation sheet is been tested in a project currently in progress. The study includes also a comparison of two different design process.</p> <p>Parametric design accelerates the preliminary definition of structural parts and foundation loads. Calculation sheet also defines the pre-sizes of the structural parts. Parametric model can be linked to Tekla structures and different software based on the finite element method like RFEM. Parametric design is interesting additional feature for civil engineering. This thesis provided useful information of the possibilities of the parametric design. Parametric design has a lot potential in civil engineering which has not been fully discovered yet.</p>			
Additional Information			

ALKUSANAT

Diplomityön tarkoituksena on ollut tutustua parametriseen suunnittelun mahdollisuuksiin betonirakenteiden suunnittelussa. Työssä luotu laskentapohja luotiin visuaalisella ohjelmoinnilla, josta minulla ei ollut lainkaan kokemusta. Diplomityön aihe mahdollisti yksityiskohtaisen tutustumisen uusiin ohjelmistoihin ja suunnittelumenetelmiin. Aiheen alussa kokonaisuus tuntui etäiseltä ja jokseenkin mahdottomalta, mutta pian työn suorituksen aloitettua syntyi suuri mielenkiinto työn aihealuetta kohtaan.

Haluan kiittää Oulun Swecon toimiston henkilöitä Esa Tuohimaata, Tuomas Jaakkolaa ja Veli-Matti Hannillaa aktiivisesta työn kommentoinnista. Erityisesti haluan kiittää toista työni ohjaajaa Eemeli Tikkasta kunnan arvoisista vinkeistä työn aikana. Eemelin asiantunteva ja innostava ohjaus työn aikana vaikutti olennaisesti työn etenemiseen ja lopulliseen valmistumiseen. TkT Antti Niemi toimi toisena ohjaajana yliopiston puolelta. Kiitos Antille työn rakenteellisten seikkojen avustamisesta sekä jouhevasta yhteistyöstä. Kiitokset kuuluu myös Sweco Rakennetekniikalle mielenkiintoisesta aiheesta ja mahdollisuudesta työn suorittamiseen. Lisäksi haluan kiittää kaikkia työhöni osallistuneita osapuolia yrityksen sisällä saamastani avusta ja ohjauksesta. Diplomityö on rahoitettu Sweco Rakennetekniikan toimesta ja suoritettiin Oulun yliopiston teknillisen tiedekunnan rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelmaan.

Oulu, 07.05.2019



Paavo Vähänen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	8
2 BETONIRAKENTEISTEN RUNKOJEN LUONNOSSUUNNITTELU	10
2.1 Runkojärjestelmä	10
2.1.1 Pilari-laatta.....	11
2.1.2 Pilari-palkki-laatta.....	11
2.1.3 Kantavat seinät-laatta	11
2.1.4 Ydinjärjestelmä	12
2.2 Rakentamistapa	12
2.2.1 Paikallavalurunko.....	13
2.2.2 Elementtirakenteinen runko	13
2.3 Jäykistyssuunnittelu	13
2.3.1 Mastojäykistys	16
2.3.2 Kotelorakenteiset mastot	16
2.3.3 Levy- ja ristikkojäykistys	17
2.3.4 Kehäjäykistys.....	17
2.3.5 Yhdistelmäjäykistys	18
2.4 BES-järjestelmä	18
2.5 Rakenneosat	19
2.5.1 Pystyrakenteet	19
2.5.2 Vaakarakenteet.....	21
2.6 Luonnossuunnittelun osavaiheet	23
3 NUMEERINEN ANALYYSI	25
3.1 Elementtityypit.....	25
3.1.1 1D-elementti	25
3.1.2 2D-elementti	25
3.2 Elementtiverkko	26
3.3 Numeerisen laskentamallin luonti.....	26
3.4 Lineaarisen rakenneanalyysin vaiheet	26
4 PARAMETRINEN SUUNNITTELU.....	28
4.1 Rhinoceros 3D ja Grasshopper	31

4.2 Karamba 3D	33
4.2.1 Karamban puutteellisuudet ja yksinkertaistukset.....	34
4.3 Grasshopper-Tekla Live Link	35
4.4 Ohjelmistojen yhteys toisiinsa	35
4.5 Parametrisen mallin luominen algoritmiavusteisesti	36
4.6 Sovellutukset rakennesuunnittelussa	38
4.7 Parametrisen suunnittelun mahdollisuudet	41
4.8 Parametrisen suunnittelun hyödyntäminen teräsbetonisten runkojen luonnossuunnittelussa	41
5 LUONNOSSUUNNITTELUUN LUOTU LASKENTAPOHJA	42
5.1 Parametrisen mallin muodostaminen	42
5.2 Lähtöparametrit ja käyttöliittymä.....	43
5.3 Runkoluonnossuunnitteluun luotu algoritmi	43
5.3.1 Geometrian kokoaminen	44
5.3.2 Tasojen ja seinien aukotus.....	45
5.3.3 Tasojen ja seinien verkotus.....	46
5.3.4 Rakenneosien luominen.....	47
5.3.5 Tuentahtojen määrittely	49
5.3.6 Kuormitusten mallintaminen	50
5.3.7 Laskentamallin luominen	51
5.3.8 Rakenneosien mitoitus	52
5.3.9 Iterointi	54
5.4 Parametrinen malli	55
5.5 Yksinkertaistukset	58
6 TUTKIMUSOSIO.....	59
6.1 Tutkimuskohteen esittely.....	59
6.2 Runkojärjestelmän valinta	63
6.3 Jäykistyssuunnittelu	64
6.4 Muutokset	65
6.5 Kuormitukset ja kuormitusyhdistelmät	66
6.6 Luodun laskentapohjan soveltaminen tutkimuskohteeseen.....	67
6.6.1 Parametrisen mallin luominen	67
6.6.2 Lähtötiedot ja perusoletukset.....	70
6.6.3 Parametrinen malli	71
7 TUTKIMUKSEN TULOSTEN ANALYSOINTI.....	72
7.1 Tarkasteltavat rakenneosat.....	72
7.2 Tulosten vertailu ja analysointi.....	75

7.3 Parametrisen suunnittelun puutteellisuudet ja ongelmat	77
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	79
9 YHTEENVETO.....	81
10 LÄHDELUETTELO	

1 JOHDANTO

Rakennushankkeen luonnossuunnitteluvaiheessa tulee rakenteiden toimivuuden sekä kantavien ja jäykistävien rakenteiden toimivuuksien havainnollistamiseksi piirtää havainnollistavia runkoleikkauksia ja tehdä alustavaa runkorakenteiden mitoitusta sekä arvioida rakennuksen kokonaisstabiliteettia. Vaativimmissa tapauksissa on muodostettava FEM-laskentamalli. Lisäksi eri runkoratkaisujen nopea keskinäinen vertailu sekä rakenteellisten ominaisuuksien muutokset luovat haasteita luonnossuunnittelulle. Laskentamallin muokkaaminen sekä uudelleenrakentaminen vie ison ajan muusta suunnittelutyöstä. Mikäli laskentamallin luonti ja rakenneosien esivalinta saataisiin automatisoitua, voitaisiin eri vaihtoehtoja vertailla helposti jo alkuvaiheessa hanketta. Tämä lisäisi huomattavasti suunnitteluprosessin tehokkuutta, kun rutiininomaiseen suunnittelutyöhön kulunut aika voitaisiin hyödyntää vaativampaa osaamista edellyttäviin tehtäviin.

Parametrinen suunnittelu perustuu riippuvuussuhteiden rakentamiseen lähtötietojen ja lopullisten tulosten välille. Diplomityön tarkoituksena oli tutkia parametrinen suunnittelun soveltuvuutta betonirakenteiden runkojen luonnossuunnitteluun. Työn tavoitteena oli luoda työkalu luonnossuunnitteluvaiheeseen eri runkoratkaisujen nopeaan vertailuun sekä rakenteiden ja perustuskuormien alustavaan mitoitukseen. Rakenteiden alustavaan mitoitukseen sovellettiin konservatiivista laskentamenetelmää sekä taulukkomitoitusta, jossa eri rakenneosille on määritelty kestävyys tietyillä käyttöasteilla. Numeerisella mallintamisella saatuja tuloksia sovellettiin rakenteiden alustavien poikkileikkausten määrittelemiseksi.

Työhön liittyen on tehty rajoituksia jo alkuvaiheessa. Aloituspäätöksessä sovittiin, että työssä keskitytään nimenomaan rakenneosien alustavaan mitoitukseen, joka on riittävä taso luonnossuunnitteluvaiheessa. Lisäksi sovittiin, että rakenneosien kohdalla jätetään välipohjarakenteen alustava mitoitus työn ulkopuolelle. Jatkuvan sortuman huomioiminen CC3b rakenteille rajattiin myös työn ulkopuolelle. Työn suorituksen aikana tutustuttiin käytettävien ohjelmistojen rajapintoihin ja muiden sovellusten linkitysmahdollisuuksiin.

Tämä työ on jatkoa muun muassa Erkkilän (2017) tekemään diplomityöhön ”Algoritmiavusteisen suunnittelun hyödyntäminen betonielementtirakenteiden suunnittelussa”. Työssään Erkkilä tutkii, miten algoritmiavusteista suunnittelua voidaan soveltaa betonirakenteisen väliseinien mallintamisessa. Tämän lisäksi työssä on avattu hyvin yksityiskohtaisesti parametrisuuden käsitettä sekä esitelty sovellutuksia alalta ja sen ulkopuolelta. Lisäksi työssä on käsitelty parametrinen mallin linkitystä Tekla Structures -ohjelmaan. Tämän vuoksi tässä työssä ei ole yksityiskohtaisesti paneuduttu parametrisuuteen käsitteenä vaan tuotu esiin aiheesta tarpeellinen taustatieto työn suorittamista varten. Erkkilän diplomityö on ladattavissa verkosta.

Kirjallisuusuosiuudessa käsitellään betonirakenteisen rakennuksen rungon luonnossuunnitteluun liittyviä seikkoja. Työssä esitellään yleisesti käytetyt runko- ja jäykistysjärjestelmät sekä esitellään luonnossuunnittelun osavaiheita. Työssä pureudutaan myös parametrinen suunnittelun menetelmiin, joiden yhteydessä esitellään tutkimusuosiuudessa käytettäviä ohjelmistoja ja niiden ominaisuuksia. Lisäksi esitellään parametrinen suunnittelun mielenkiintoisia sovellutuksia rakennesuunnittelun puolelta. Työn aikana saatiin hyvä kokonaisvaltainen kuva parametrinen ja algoritmiavusteisen suunnittelun ominaisuuksista ja mahdollisuuksista. Kaikkea työn aikana selvitettyä ei kirjattu työhön vaan työssä esitellään tutkimusuosiuuden kannalta oleelliset asiat.

Tutkimusuosiossa sovelletaan parametriseen suunnitteluun luotua laskentapohjaa käynnissä olevaan luonnossuunnitteluhankkeeseen. Laskentapohjan käyttö tutkimuskohteessa toi hyvin esiin sen puutteellisuudet, joita täydennettiin laskentapohjaan mahdollisimman paljon. Tiettyjä yksinkertaistuksia jouduttiin tekemään ja ne ovat listattu työhön. Samalla saatiin tärkeää vertailudataa tutkimuksen tukemiseksi. Työn tutkimusuosiossa vertaillaan kahden eri suunnittelumenetelmän tuloksia, parametrinen suunnittelun ja perinteisen laskennan.

2 BETONIRAKENTEISTEN RUNKOJEN LUONNOSSUUNNITTELU

Rakennushankkeen rakennesuunnitteluvaihe jakautuu kolmeen osaan: ehdotus-, yleis- ja toteutussuunnitteluun. Karkeasti voidaan puhua ehdotus- ja yleissuunnitteluvaiheesta luonnossuunnitteluna. Luonnossuunnittelun tehtävänä on määrittää rakennuskohteen tekninen toteuttamistapa, joka sisältää kohteen runkojärjestelmän valinnan jäykistysjärjestelmä mukaan lukien. Luonnossuunnitelmat sisältävät myös perustamistavan sekä kantavat ja osastoivat rakenneosat. Alkuvaiheessa rakennushanketta tehtävät päätökset luovat pohjan hankkeen toteutussuunnittelulle ja vaikuttavat hyvin voimakkaasti hankkeen kokonaiskustannuksiin. Luonnossuunnitteluvaiheessa arvioidaan rakenteiden paksuuksia konservatiivisesti tilasuunnittelun kannalta, jotta vältytään rakenteiden ulkomittojen suurentamiselta myöhemmässä vaiheessa hanketta. Tässä kappaleessa käsitellään betonirakenteisen rakennuksen rungon luonnossuunnitteluun liittyviä seikkoja.

2.1 Runkojärjestelmä

Rakennuksen runko on rakenteellisesti oleellisin ja tärkein rakennuksen osa. Runko tulee suunnitella tarkoin, sillä rakenteelliset muutokset jälkikäteen ovat hyvin haasteellista ja kallista toteuttaa. Hankkeen alkuvaiheessa tulee kartoittaa kaikki rungon toimintaan sekä rakennushankkeeseen vaikuttavat tekijät, jotta voidaan valita kyseisten seikkojen perusteella sopiva runkojärjestelmä. Arkkitehdin määrittämän ulkomuodon ja pohjaratkaisujen toteuttamiseksi soveltuu usein yksi tai useampi runkojärjestelmä. Runkojärjestelmän valintaan vaikuttavat muun muassa:

- rakennuksen käyttötarkoitus
- rakennuksen ulkomuoto ja korkeus
- rakennuksen kuormat.
- rakennuksen pohjaratkaisut
- talotekniset ominaisuudet
- ulokerakenteet
- rakennuspaikka.

Runkojärjestelmätyypin valinta edellyttää rakennesuunnittelijan ja arkkitehdin tiivistä yhteistyötä luonnossuunnitteluvaiheesta lähtien. Runkojärjestelmätyyppejä on useita erilaisia. Käsitellään tässä työssä yleisimpiä betonirakenteisissa rungoissa käytettäviä runkojärjestelmätyyppejä. Tässä työssä esiteltyjen järjestelmien lisäksi rakennusten runkoja toteutetaan myös yhdistelmärakenteina. Yhdistelmärakenteita näkee usein kaupunkialueelle rakennettavissa rakennuskohteissa, joissa usein autopaikat on sijoitettu rakennuksen kellarikerrokseen ja rakennuksen ensimmäiset kerrokset ovat liike- ja toimistotiloja sekä loput asuntoja. Rakennuksen ulkomuoto, käyttötarkoitus ja pohjaratkaisut voivat usein suoraan määrätä käytettävän runkojärjestelmätyypin.

2.1.1 Pilari-laatta

Yleisesti käytetty liike ja tuotantorakennuksissa, mutta voidaan soveltaa myös asuinrakentamiseen. Pilari-laattajärjestelmä vaatii toimiakseen paikalla valetun, kahteen suuntaan kantavan välipohjarakenteen, joka voi koostua tasavahvasta laatasta, arinalaatasta tai sienivahvistetusta laatasta. (Vänttilä, 2016.) Pilarin ja laatan liitosten muodostama kehävaikutus toimii jäykistävänä järjestelmänä matalilla rakenteilla. Erillinen jäykistäminen voidaan hoitaa mastoseinillä tai hissi- ja porraskuilun seinillä tai näiden yhdistelmillä.

2.1.2 Pilari-palkki-laatta

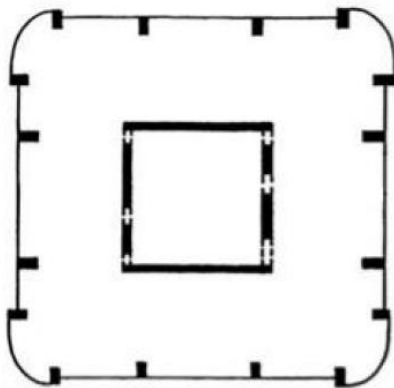
Yksi yleisimmin käytetyistä runkojärjestelmistä toimistorakennuksissa. Palkkien käyttö mahdollistaa myös yhteen suuntaan kantavien välipohjarakenteiden käyttämisen. Kantava välipohjalaatta tukeutuu pilarien päissä oleviin palkkeihin. Palkkien avulla päästään pitkiin etäisyyksiin pystyrakenteiden välillä. Pitkät etäisyydet kasvattavat avoimen tilan suuruutta, joka on edellytyksenä usein toimistorakentamisessa. Jäykistäminen toteutettava erillisillä rakenteilla, kuten mastoseinillä tai hissi- ja porraskuilun seinillä tai näiden yhdistelmillä. (Vänttilä, 2016.)

2.1.3 Kantavat seinät-laatta

Yleisin Suomessa käytetty runkoratkaisu asuinrakentamisessa, jossa välipohjalaatasto tukeutuu kantaviin väli- tai ulkoseiniin. Jäykistäminen on toteutettu poikkisuunnassa kantavilla seinillä ja hissi- ja porraskuilun seinillä. (Vänttilä, 2016.)

2.1.4 Ydinjärjestelmä

Ydinjärjestelmä koostuu rakenteesta, joka on pystysuunnassa yhtenäinen koko rakennuksen läpi. Tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi kotelomaiset porras- ja hissikuilut. Ydinjärjestelmä voi myös koostua erillisistä epäsymmetrisistä seinistä sekä useammasta erillisestä rakenteesta. Käytettäessä pelkästään yhtä rakennetta, kuten hissi- ja porraskuilua ydinjärjestelmän rakenteena, voivat seinien paksuudet kasvaa liian kohtuuttomiksi kyseisten rakenteiden osalta. Ydinjärjestelmä soveltuu hyvin korkean rakennuksen runkojärjestelmäksi sen ominaisuudesta ottaa vastaan kahdesta suunnasta leikkausvoimia ja taivutusmomenttia. (Taranath, 2010.) Tämän vuoksi se on yksi yleisimmin Suomessa käytetyistä korkeiden rakennusten runkojärjestelmistä.



Kuva 1. Ydinjärjestelmä mukailten lähdettä (Taranath, 2010).

2.2 Rakentamistapa

Rakennuksen runko voidaan jaotella myös rakentamistavan mukaan. Rakennuskohteen runko voidaan valmistaa pääsääntöisesti kahdella eri tavalla. Runko toteutetaan elementein, paikalla valamalla tai näiden kahden yhdistelmällä. Usein käytetään molempia valmistusmenetelmiä rakennuskohteen eri rakenneosien valmistamiseen, sillä molemmilla menetelmillä on omat etunsa ja soveltuvuutensa tietynlaisille rakenteille. Rakennushankkeen luonnossuunnitteluvaiheessa eritellään paikalla valettavat rakenteet ja elementtirakenteet. Rakentamistapa voi usein määräytyä tilaajan toiveesta, johon vaikuttaa muun muassa rakennushankkeen aikataulu sekä hankkeen kustannussuunnittelu. Käsitellään seuraavaksi paikallavalu- ja elementtirungon ominaisuuksia ja niiden soveltuvuus erilaisille rakenteille.

2.2.1 Paikallavalurunko

Paikalla valaminen on maailman yleisin rakentamistapa. Rakennuksen perustukset ja maanvaraiset rakenteet toteutetaan yleensä paikalla valamalla. Betonirakenteisen rakennuksen runko voidaan toteuttaa myös kokonaisuudessaan paikalla valamalla. Suurin etu elementtirakentamiseen verrattuna, on suunnittelun vapaus. Paikallavalurunko soveltuukin hyvin vaativan rakennuskohteen runkojärjestelmäksi sen muunneltavuuden ja rakenteellisen jatkuvuuden vuoksi. Paikalla valetusta rakenteesta koostuu luja kokonaisuus, jota ei tarvitse tukea erillisillä jäykisteillä kuten elementtirakenteita. Rakenneosien väliset liitokset ovat saumattomia ja niihin saavutetaan hyvät säänkestävyys ja lujuusominaisuudet. Paikalla valettu välipohjarakenne soveltuu hyvin ulokkeiden toteuttamiseen ja sillä on korkean massansa vuoksi hyvät ääneneristysominaisuudet. (Betoniteollisuus ry, 2019.)

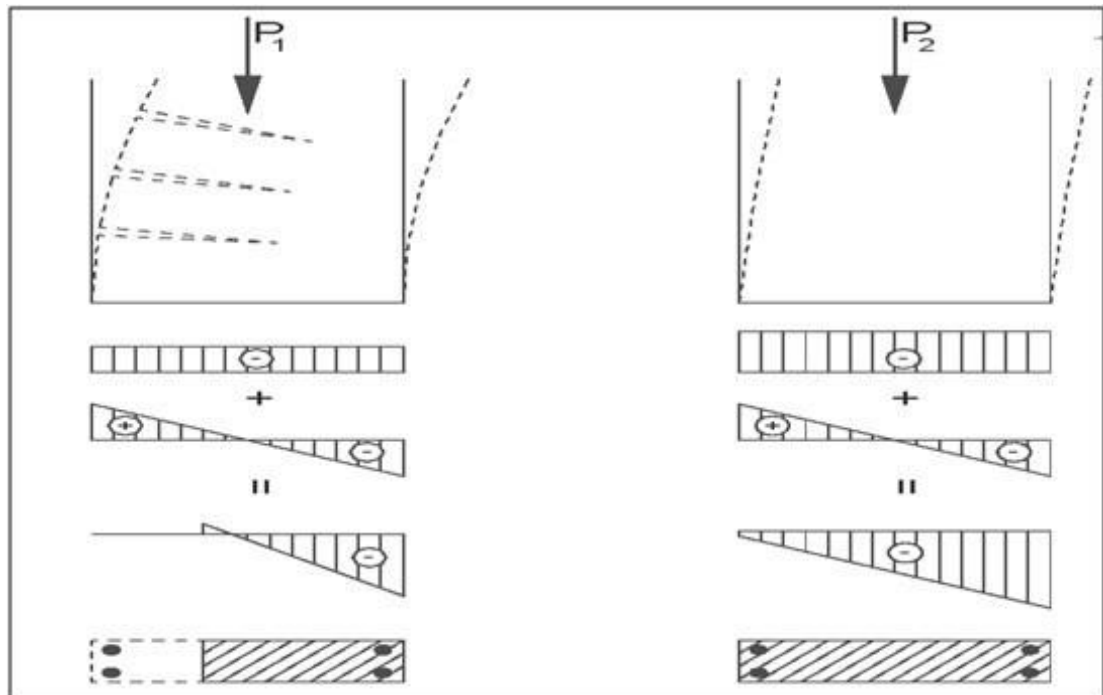
2.2.2 Elementtirakenteinen runko

Rakennuksen runko voidaan toteuttaa kokonaisuudessaan tai osittain elementtitekniikalla. Suurin saavutettu etu elementtirakenteilla on pystytysnopeus. Rakentaminen on jouhevaa, kun työjärjestys on selkeä ja ennalta määritelty. Lisäksi elementtirakennetta voidaan kuormittaa yleensä heti asentamisen jälkeen. Ulkoseinät sekä parvekelaatat valmistetaan usein elementein niiden hankalan muotittamisen vuoksi. Ulkoseinin valamiseen tarvitaan rakennuksen ulkopuolisia telineitä suurmuottien kannattelemiseksi. Parvekelaattojen kallistusvalut vaativat puolestaan kuppivalun vedenpoistoa varten. Rakenteiden esijännitys mahdollistaa pitkien jännevälien toteuttamisen.

2.3 Jäykistysuunnittelu

Rungon jäykistysuunnittelu on yksi rakennesuunnittelun tärkeimpiä tehtäviä. Rakennusrunkoa suunniteltaessa on lähtökohtana mietittävä rakenteen jäykistävää järjestelmää. Perusvaatimuksina rakennuksen rungolle on riittävän stabiilisuuden takaaminen sekä vaakakuormien siirtäminen perustuksille ilman suurempia muodonmuutoksia. Lisäksi ehtona jäykistäville rakenteille on, että niiden on säilyttävä halkeilemattomana käyttörajatilan kuormitusyhdistelmien vaikutuksesta. (Leskelä, 2008.)

Rakennusta rasittavat kuormat voidaan jakaa vaaka- ja pystykomponentteihin, joita rakennuksen rungon eri osat kantavat taivutettuina, vedettyinä, puristettuina, vääntökuormitettuina tai leikkauskuormitettuina sekä näiden yhdistelminä. Kuormat siirtyvät edellä mainituilla tavoilla rakenneosilta toisille ja lopulta perustuksien kautta maapohjaan. Jäykistysjärjestelmä osallistuu edellä mainittuihin voimien siirtymiseen siten, että millegään rakenneosalle ei synny kohtuuttoman suuria voimia ja ettei perustuksiin kohdistuisi vetorasituksia. Kuormitukset jakautuvat jäykkyysien suhteessa. Rungon jäykimmät rakenneosat vastaanottavat eniten rasituksia (Leskelä, 2008.). Kuva 2 havainnoi kuinka pystykuorman vaikutus vähentää taivutuksesta johtuvan vedon vaikutusta rakenteen alapäässä. Oikealla olevalle rakenteelle kohdistuu suurempi pystykuormitus, joka vähentää taivutuksesta johtuvan vedon vaikutusta siten, ettei rakenteen alapäähän kohdistu olleenkaan vetorasituksia.



Kuva 2. Pystykuorman vaikutus rakenneosan jännitystilaan. Pystykuormitus P_2 on suurempi, jonka vuoksi rakenteeseen kohdistuvasta taivutuksesta ei pääse syntymään vetorasitusta rakenteen alapäässä. (Betoniteollisuus ry 2010a.)

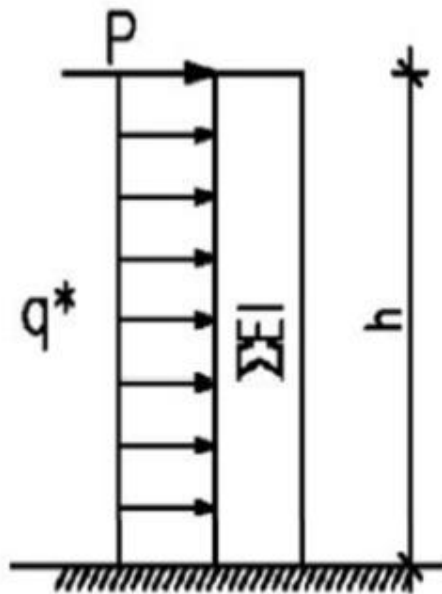
Ensimmäisessä rakenteessa poikkileikkaukseen kohdistuu vetorasituksia puristavan voiman ollessa pieni. Toisessa rakenteessa puristava voima kumoo taivutuksesta johtuvan vedon rakenteelle.

Rakennuksen jäykkyyttä voidaan arvioida likimääräisin menetelmin kaavalla (1) (Betoniteollisuus ry, 2010a).

$$\sum EI \geq \frac{q^* h^3}{8} + \frac{P h^2}{3} \quad (1)$$

missä

- q on $b \cdot q$
- h on rakennuksen korkeus [m]
- P on pistekuorma rakennuksen yläreunassa käyttörajatilassa [kN]
- b on rakennuksen leveys laskentasuuntaa vasten kohtisuorassa [m]
- q on rakennuksen vaakakuorma käyttörajatilassa, sisältäen tuulen ja lisävaakavoiman [kN/m²]
- $\sum EI$ on tarkasteltavassa suunnassa toimivien jäykisteiden taivutusjäykkyyksien summa [MN/m²]
- E on kimmokerroin [MN/m²]
- I on jäyhyysmomentti [m⁴].



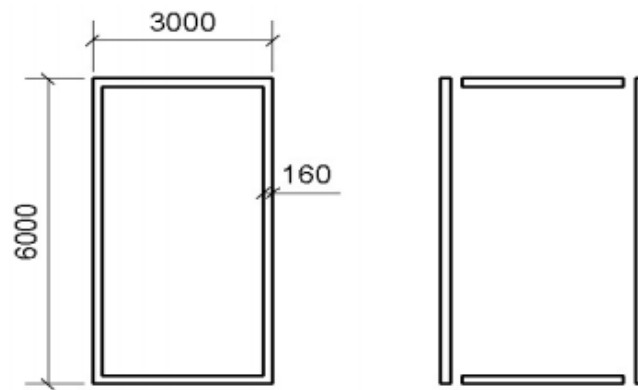
Kuva 3. Alustavan jäykistyslaskennan merkinnät (Betoniteollisuus ry, 2010a).

2.3.1 Mastojäykistys

Mastojäykistys toteutetaan rakenteilla, jotka toimivat ulokepalkin tavoin alapäästään jäykästi kiinnitettyinä ulokerakenteina, joiden kautta rakennuksen vaakakuormitukset siirtyvät perustuksille. Kuormat siirtyvät rakenteille niiden jäykkyyksien suhteissa. Monikerrosrungon jäykistys hoidetaan yleensä mastojäykistyksellä, joka koostuu mastoseinistä ja mastoseinien muodostamista kotelopoikkileikkauksista tai avoimista poikkileikkauksista, kuten hissikuiluista ja porrastorneista. Korkeissa rakennuksissa tämä jäykistysjärjestelmä on yleensä ainoa mahdollinen. Kolmesta neljään kerrokseen tai enintään 12 m korkuisissa rakennuksissa voidaan vielä käyttää mastopilareita, mutta korkeuden kasvaessa mastopilareiden dimensiot kasvavat liian suuriksi. (Leskelä, 2008.) Mastojäykisteitä käytettäessä voidaan muut pystyrakenteet suunnitella nivelellisinä ja niiden koot pysyvät maltillisina. (Betoniteollisuus ry, 2010a.) Mastojäykistyksen suunnittelu- ja mallintamisperusteita on esitetty laajemmin Jaakkolan (2011) diplomityössä.

2.3.2 Kotelorakenteiset mastot

Rakennuksen hissi- ja porrastornit muodostavat kotelomaisia rakenteita, jotka jatkuvat koko rakennuksen läpi. Nämä kotelomaiset rakenteet toimivat ulokkeina mastojäykistyksen tavoin siirtäen tehokkaasti suuria pysty- ja vaakakuormia perustuksille. Kotelomaisia mastoja suunniteltaessa on muistettava mitoittaa liittyvien seinien liitokset väännöstä aiheutuvalle leikkausvoimalle, jotta rakenneosat voidaan ajatella toimivan kokonaisuutena. Oikein mitoitettun tornin jäykkyys voi olla, jopa kaksinkertainen erillisten seinien yhteenlaskettuun jäykkyyteen verrattuna. Esimerkiksi kuvan 4 mukaisten seinien yhteenlaskettu jäyhyysmomentti on $I_{seinät} = 5.76 \text{ m}^4$ ja tornin $I_{torni} = 13.07 \text{ m}^4$. (Betoniteollisuus ry, 2010a.)



Kuva 4. Kotelomaisen maston seinien dimensiot (Betoniteollisuus ry, 2010a). Seinien yhteenlaskettu jäyhyysmomentti on $I_{\text{seinät}} = 5.76 \text{ m}^4$ ja tornin $I_{\text{torni}} = 13.07 \text{ m}^4$

2.3.3 Levy- ja ristikkojäykistys

Rakennuksen jäykistäminen voidaan toteuttaa rungon aukkoihin sijoitettavilla levyillä tai ristikoilla. Levyjäykisteet siirtävät vaakakuormista aiheutuvat rasitukset levyjen leikkausvoimina muille rakenteille ja lopulta perustuksille. Tasojen väliset jäykät levyt välittävät vaakakuormat jäykistäville levyille, joiden välillä kuormat välittyvät leikkausvoimina ja lopulta alemman tason välipohjarakenteelle vaakakuormina. Erityisesti elementtirakenteisilla rungoilla jäykistävät levyt on järkevä sijoitella kerroksittain päällekkäin, jolloin vältetään vaakavoimien siirtämisessä välipohjatasossa. Levyjäykisteitä on oltava vähintään kolme kappaletta yhdessä kerroksessa. Levyjäykisteiden sijoittelu kerroksittain on melko vapaata, kunhan jäykistelevyjä on sijoitettu kaikkiin rakennuksen pääsuuntiin. (Betoniteollisuus ry, 2010a.)

Ristikkojäykistys toimii levyjäykisteen tavoin välittämällä tasojen väliset vaakakuormat veto- ja puristusvoimina. Lisäksi ristikkojäykistystä voidaan helposti käyttää apuna rakennusvaiheen aikaisessa jäykistämisessä. Yleisesti on kuitenkin suositeltavaa suunnitella rakennuksen runko- ja jäykistysjärjestelmä siten, ettei väliaikaisia tukijärjestelmiä tarvittaisi. (Betoniteollisuus ry, 2010a.)

2.3.4 Kehäjäykistys

Kehäjäykistystä käytetään usein matalille 1-3 kerroksisille teollisuusrakennuksille sen tuoman avoimen rakenteen ansiosta. Kehäjäykistys mahdollistaa korkeiden rakennekorkeuksien käyttämisen. Kehäjäykistys voidaan toteuttaa molemmille rakennuksen pääsuunnille tai pelkästään toiselle pääsuunnalle. Kehäjäykistys koostuu

alapäästään nivelellisesti tai jäykästi tuetuista pilareista, joiden nurkat ottavat vastaan vaakakuormien rasituksia taivutusrasitettuina. (Betoniteollisuus ry, 2010a.)

2.3.5 Yhdistelmäjäykistys

Betonirakenteisen rakennuksen runko voi koostua useasta eri runkojärjestelmätyypistä. Rakennuksessa käytettävä jäykistysjärjestelmä koostuu usein myös eri jäykistysjärjestelmistä, joissa edellä esiteltujen jäykistysjärjestelmien soveltuvuudet eri rakennuksen kerroksille ja osille on hyödynnetty taloudellisen kokonaisuuden muodostamiseksi. Yhdistelty jäykistysjärjestelmänä voi koostua esimerkiksi masto- ja ristikkojäykistyksen yhdistelmästä. Toinen yhdistelmä voisi olla esimerkiksi levyjäykistetty rakenne, jonka ylin kerros on jäykistetty mastopilareilla. (Betoniteollisuus ry, 2010a.)

2.4 BES-järjestelmä

BES-järjestelmä on Suomessa vuosina 1968-1970 kehitetty asuinrakentamista standardisoiva avoin järjestelmä. 1970-luvun ennätysmäinen asuntotuotanto ei olisi ollut mahdollista ilman vakinaistettua järjestelmää. Suunnittelu tehostui, kun betonielementit ja niiden liitosdetaljit oli standardisoitu. Lisäksi rakentaminen oli urakoitsijalle helpompaa, kun valmisosia oli mahdollista hankkia usealta eri toimittajalta samaan rakennukseen. Standardi koostui pääpiirteittäin kantavista väli- ja päätyseinistä, ei-kantavista sandwich -ulkoseinistä sekä ontelolaattavälipohjasta. (Betoniteollisuus ry, 2010b.)

Runko-BES jatkokehitettiin 1980-luvun lopulla BES-järjestelmän laajentamiseksi Suomen Betoniteollisuuden Keskusjärjestön toimesta. Runko-BES kehitettiin toimitila- ja teollisuusrakentamista varten. Standardi koostuu pilari-palkkirungolle laaditusta mittajärjestelmästä, runkojärjestelmästä, rakennusosien mitta- ja tyyppisuosituksista, suosituksista rei'ille, tartunnoille ja jälkikiinnityksille sekä suosituksista elementtien keskinäisille liitoksille. Runko-BES on tehostanut rakennushankkeen esisuunnittelu- ja suunnitteluvaiheen toteuttamista muun muassa yhtenäisen mittajärjestelmän avulla. (BES, 1988.)

Betoniteollisuus ry on suorittanut BES-järjestelmän sekä eurokoodien pohjalta kehityshankkeen, jonka lopputuloksena syntyi BES 2010-järjestelmä. Järjestelmä sisältää

suunnitteluohjeet sekä esimerkkilaskelmat ja -tietomallit betonielementtirakenteille. Teos sisältää myös laskentaohjeita rungon jäykistysuunnitteluun ja esimerkkejä yleisimmin käytetyistä runkojärjestelmistä. (Betoniteollisuus ry, 2010c.)

2.5 Rakenneosat

Rakenneosien alustavien poikkileikkausten määrittäminen on olennainen osa luonnossuunnittelua. Tilasuunnittelun kannalta on oleellista havainnollistaa rakenteiden nimellismittoja. Rakennushankkeen alkuvaiheessa on hyvä säilyttää matala käyttöaste rakenteilla, jotta vältetään rakennepaksuuksien kasvattamiselta myöhemmässä vaiheessa hanketta. Matalilla käyttöasteilla voidaan myös huomioida pystyrakenteiden hoikkuuksia ja nurjahdusta. Seinillä käytettävä käyttöaste on noin 60-80 % ja pilareilla 70-90 %.

2.5.1 Pystyrakenteet

Kuten mainittu, rakenteiden paksuuksia arvioidaan luonnosvaiheessa konservatiivisesti. Kantavien pystyrakenteiden alustavat nimellisdimensiot voidaan määrittää likimääräisillä mitoitusmenetelmillä rakenneosassa vaikuttavan normaalivoiman perusteella. Alustavien dimensioiden avulla skaalataan rakenteet oikeaan kokoluokkaan myöhempää mitoitusta varten. Rakenneosassa vaikuttavan normaalivoiman mitoitusarvo ei saa ylittää puristuslujuuden mitoitusarvon perusteella laskettua rakenneosan kestävyyttä (2).

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} \leq 1, \quad (2)$$

missä N_{Ed} on normaalivoiman mitoitusarvo [kN],
 N_{Rd} on rakenneosan kestävyys puristuslujuuden mukaan [kN],

Rakenneosan kestävyys betonin puristuslujuuden mitoitusarvon ja poikkipinta-alan suhteen voidaan laskea kaavasta (3).

$$N_{Rd} = f_{cd} * A_c \quad (3)$$

missä f_{cd} on puristuslujuuden mitoitusarvo [kN/mm²],
 A_c on rakenneosan poikkipinta-ala [mm²],

Puristuslujuuden mitoitusarvo voidaan laskea kaavasta (4) (BY 60, s.26).

$$f_{cd} = 0,85 \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (4)$$

missä f_{ck} on betonin lieriölujuus [MPa],
 γ_c on betonin osavarmuusluku, jonka arvo on normaalitilanteessa 1,5

Sijoittamalla kaavojen 3 ja 4 muuttujat kaavaan 2, voidaan kaava jälleen muokata muotoon, jossa rakenneosan vaadittava poikki-pinta-ala on määritelty normaalivoiman mitoitusarvon suhteen. Rakenneosien valitsemiseksi on laadittu taulukoita BES-järjestelmässä, jotka sisältävät standardisoidut suositusmitat eri rakenneosille. Taulukot on laadittu elementtirakenteille, mutta ne soveltuvat täysin myös paikallavalurakenteille määriteltäessä rakenteiden alustavia mittoja. Edellä esitetyillä kaavoilla saadut tulokset suositellaan pyöristettäväksi seuraavien taulukoiden mukaisesti.

Pilarit

Pilareiden mittasuositukset on kuvattu taulukossa 1. Suositeltavinta on käyttää neliöpilareita, mutta suositellaan myös muita suorakaidepilareita. Tauluko ulottuu leveydeltään 580 mm koon pilareihin sekä korkeudeltaan 780 mm pilareihin. Tässä työssä on sovellettu taulukko siltä osin, että neliöpoikkileikkauksia on jatkettu 980x980 mm kokoon saakka. Pieni pilari on hyvä tilasuunnittelun kannalta, mutta huono palkin tuennan kannalta. Palkki voidaan vielä tueta ongelmitta 280 mm sivumitaltaan olevaan pilariin, jonka vuoksi se on pienin suositeltavin koko taulukon 1 mukaan.

Taulukko 1. Suorakaidepilarien mittasuositukset mukaillen lähdeä (Betoniteollisuus ry, 2010d). Merkintä x tarkoittaa suositeltavinta ja o suositeltavaa poikkileikkausta.

	Leveys [mm]				
Korkeus [mm]	180	280	380	480	580
180	o				
280	o	x			
380	o	o	x		
480			o	x	
580			o	o	x
680				o	o
780					o

Seinät

Seinien alustavat paksuudet valitaan rakenteen vaatimuksesta riippuen. Tässä työssä käytetty ohuin seinän paksuus on 200 mm. Kyseisellä paksuudella saavutetaan asuinrakentamisessa äänieristyksen minimivaatimukset väliseinissä, joten on suositeltavaa käyttää kyseistä poikkileikkausarvoa lähtökohtana rakenteille. Sekä elementtirakenteiset, että paikallavaletut seinät valmistetaan tyypillisesti 20 mm välein. Kuten edellä mainittiin, seinärakenteen hoikkuudesta johtuen on suositeltavaa käyttää suurempaa varmuutta seinän alustavassa mitoituksessa verrattuna pilarin alustavaan mitoitukseen.

2.5.2 Vaakarakenteet

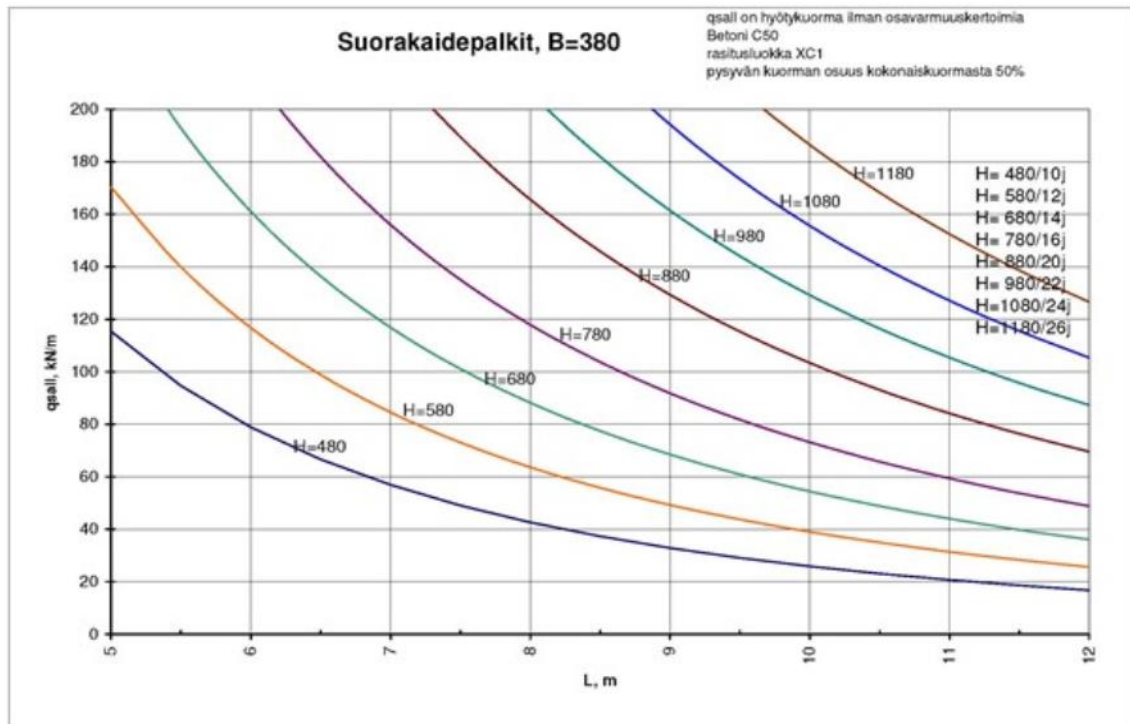
Betonirakenteisen rungon vaakarakenteet voidaan toteuttaa jännittämättöminä teräsbetonirakenteina tai jännitettyinä teräsbetonirakenteina. Vaakarakenteiden mitoittavana tekijänä toimii usein rakenteen poikkileikkauksessa vaikuttava maksimimomentti.

Palkit

Palkkeja on lukemattomia erilaisia poikkileikkauksia aina leukapalkista ristipalkkiin, mutta keskitytään tässä työssä yksinkertaisen suorakaidepalkin likimääräiseen mitoitukseen. Palkkien mittasuositukset on kuvattu taulukossa 2. Palkeille on lisäksi käytössä kantokykykäyrästäjä, joiden avulla voidaan alustavasti mitoittaa rakenneosa poikkileikkauksessa vaikuttavan maksimimomentin mukaan. Kuvassa 5 on esimerkkinä 380 mm leveän palkin korkeus palkin pituuden (L) ja karakteristisen hyötykuorman aiheuttaman viivakuorman (q_{sall}) suhteen.

Taulukko 2. Palkkien mittasuositukset mukailten lähdeä (Betoniteollisuus ry, 2010e).
Merkintä x tarkoittaa suositeltavinta ja o suositeltavaa poikkileikkausta.

	Leveys [mm]			
Korkeus [mm]	180	280	380	480
280	o			
380	o	o		
480	o	o	x	
580		x	x	x
680		o	x	o
780		o	x	x
880			x	o
980				o



Kuva 5. Jännitettyjen suorakaidepalkkien kantokykykäyrät (Betoniteollisuus ry, 2010e).

Välipohja

Betonirakenteisen rakennuksen runko jäykistetään kohdan 2.3 mukaisesti vaakavoimille siten, että välipohjat suunnitellaan ja mitoitetaan toimimaan jäykkinä levyinä, jotka siirtävät vaakavoimat jäykistäville pystyrakenteille. Tässä työssä rakennuksen välipohja huomioidaan pelkästään rakenteellisena massana sekä kuormaa jakavana rakenteena,

joka välittää vaaka- ja pystyvoimia pystyrakenteille. Kuvassa 6 on esitetty yleisimmät elementtirakenteiset välipohjarakenteet.



Kuva 6. Elementtirakenteiset laattatyypit (Betoniteollisuus ry, 2010f).

Välipohjarakenne voidaan toteuttaa myös paikalla valamalla tai liittorakenteena. Liittorakenteena voi toimia esimerkiksi kuorilaatta ja kuorilaatan päälle valettava pintalaatta. Kuorilaatta toimii pintavalulle muottina ja yhdessä ne muodostavat liittorakenteen.

2.6 Luonnossuunnittelun osavaiheet

Rakennushankkeen luonnossuunnitteluvaihe koostuu eri osavaiheista, jotka vaihtelevat hankekohtaisesti. Kuten edellä mainittiin, voidaan rakennushankkeen ehdotus- ja yleissuunnitteluvaiheesta puhua karkeasti luonnossuunnitteluvaiheena. Seuraavaksi kuvataan edellä mainittujen suunnitteluvaiheiden eri osavaiheita rakennesuunnittelun näkökulmasta. Kaikkia vaiheita ei kuvata yksityiskohtaisesti vaan tuodaan esiin tämän työn kannalta oleelliset vaiheet. Osavaiheet perustuvat rakennesuunnittelun tehtäväluetteloon (RAK12). Luonnossuunnittelun päävaiheet rakennesuunnittelun näkökulmasta ovat:

1. lähtötietojen kokoaminen ja tarkistaminen
2. tilaajan ja käyttäjän tarpeiden ja tavoitteiden täsmentäminen
3. alustavien kuormitusten määrittäminen
4. laadittavien runkoratkaisujen laajuuksien ja määrien valinta
5. tietomallipohjaisen suunnittelun sisällön ja laajuuden määrittely
6. rakentamistavan valinta yhteistyössä tilaajan kanssa
7. runko- ja jäykistysjärjestelmän valinta sekä rakennuksen kantavien linjojen hahmottaminen yhteistyössä arkkitehdin kanssa

8. rakennuksen kokonaisstabiiliteetin varmistaminen
9. kantavien rakenneosien alustava mitoitus ja varmuustason määrittely
10. keskeisten perustus- ja runkorakenteiden ja liitosten periaatteelliset rakennelaskelmat eri suunnittelurajatiloissa.
11. rakennetyyppien ja yleisleikkausten luominen
12. lähtötietojen kokoaminen toteutussuunnitteluvaihetta varten.

(Rakennesuunnittelun tehtäväluettelo RAK 12, 2012.)

Betonirakenteisen rakennuksen runko- ja jäykistysjärjestelmän valintaan vaikuttavat useat tekijät, jotka voivat vaihtua hankkeen aikana. Tämän vuoksi hankkeen alussa määritetyt rakenneratkaisut ovat harvoin lopullisia. Luonnossuunnittelun aikana suoritetaan rakennesuunnittelun näkökulmasta iterointia, toistamalla kohtia 7-9 kunnes päästään jokaisen osapuolen kannalta hyväksyttyyn ja kokonaistaloudellisesti järkevään kokonaisuuteen. Edellisten laskelmien tulokset toimivat seuraavien laskelmien ja käytettävän runko- sekä jäykistysjärjestelmän määrittelemisen lähtökohtina.

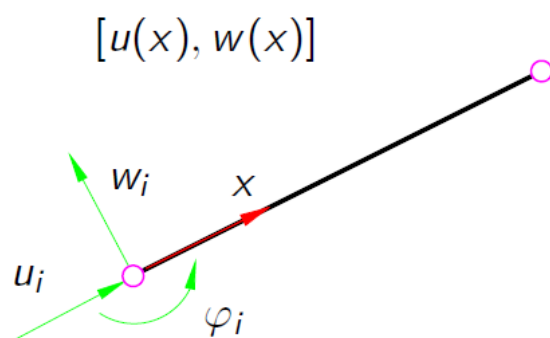
3 NUMEERINEN ANALYYSI

Rakenteiden numeerinen analyysi perustuu tavallisesti elementtimenetelmään, jossa rakenne jaetaan erillisiin osiin eli elementteihin, jotka liittyvät toisiinsa solmupisteissä. Erilliset elementit sekä solmupisteet muodostavat yhdessä elementtiverkon. Tässä kappaleessa esitellään yleisesti käytettävät elementtityypit sekä esitetään numeerisen mallin ratkaisumenetelmiä. Elementtityyppien syvempi tarkastelu sekä jäykkyysmatriisien esittely on sisällytetty Jaakkolan (2011) diplomityöhön.

3.1 Elementtityypit

3.1.1 1D-elementti

Elementtimenetelmässä rakenteet koostuvat eri elementtityypeistä, joita luonnehtivat solmupisteet sekä vapausasteet. 1D-elementti on elementtityypeistä yksinkertaisin, jossa elementillä on vähintään kaksi solmupistettä, jotka sijaitsevat elementin päissä. Solmupisteissä ovat siirtymävapausasteet u_i , v_i ja w_i sekä kiertymävapausasteet φ_x , φ_y ja φ_z . Elementille saadaan lisäksi voimasuureet taivutus- ja vääntömomentin, sekä leikkaus- ja normaalivoiman suhteen. 1D-elementillä voidaan kuvata esimerkiksi palkkeja ja pilareita. (Lumijärvi, 2018) (Jaakkola, 2011).

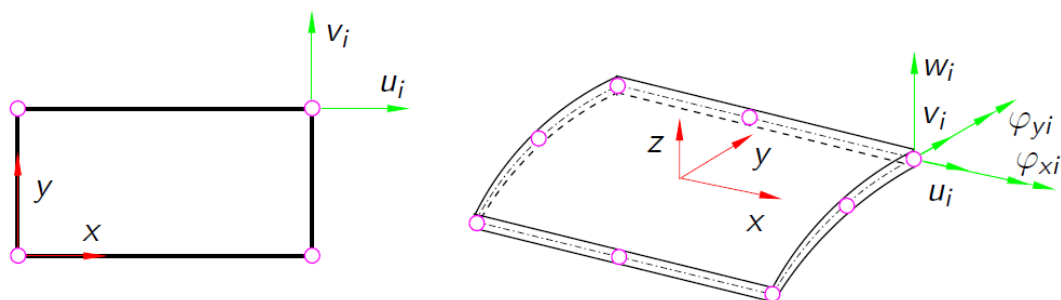


Kuva 7. Yksiulotteinen palkkielementti (Lumijärvi, 2018).

3.1.2 2D-elementti

2D-elementti on levy- tai kuorielementti, jonka jokaisessa nurkassa on solmupiste. Lisäksi solmupisteitä voi olla myös nurkkien välillä kuten kuvasta 8 nähdään. Kyseisissä elementtityypeissä on solmupisteet ja näissä vapausasteet 1D-elementin tavoin, jotta

elementit voidaan kytkeä toisiinsa. 2D-elementillä voidaan kuvata esimerkiksi laattoja ja tasoja. (Lumijärvi, 2018) (Jaakkola, 2011).



Kuva 8. 2D levy- ja kuorielementti. (Lumijärvi, 2018).

3.2 Elementtiverkko

Elementtiverkko koostuu edellä mainituista elementtityypeistä, jotka liittyvät toisiinsa solmupisteiden avulla. Mitä tiheämpi elementtiverkko rakenteen analyysille määritetään, sitä tarkempia tuloksia saadaan aikaiseksi. Elementtiverkon tihentäminen lisää huomattavasti solmupisteiden määrää, joka tarkoittaa laskentatuloksia, mutta kasvattaa käytettävää laskenta-aikaa huomattavasti. Rakennemallin koko usein ratkaisee käytettävän elementtiverkon tiheyden. Lisäksi voidaan erikseen määrittää tarkasteltavien rakenneosien elementtiverkon tiheyttä pienemmäksi mitä kokonaismallille määritetään. (Jaakkola, 2011).

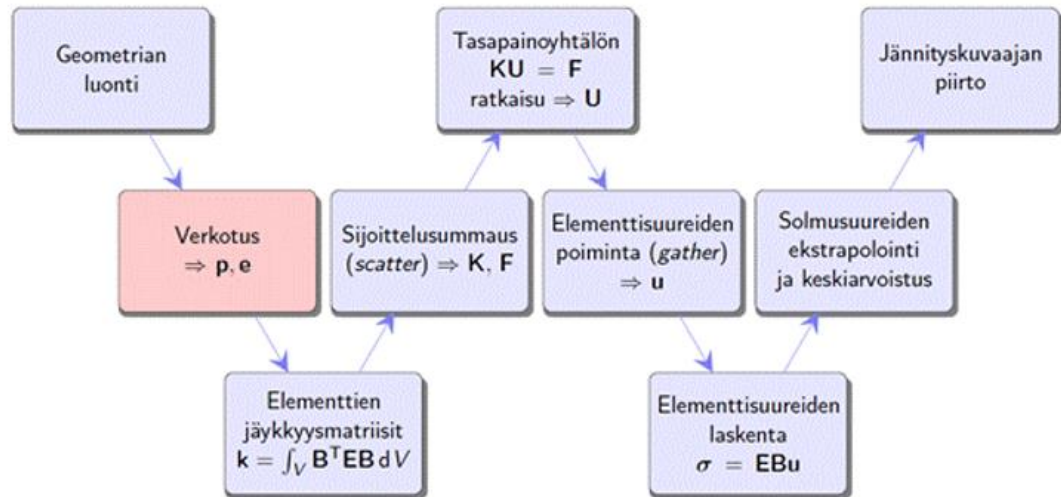
3.3 Numeerisen laskentamallin luonti

Rakenteen numeerisen laskentamallin määrittäminen alkaa lähtögeometrian luomisella, johon rakenteet mallinnetaan keskilinjojen mukaan. Elementtimenetelmiin perustuvat FEM-laskentaohjelmistot suorittavat verkotuksen yhdistämällä määritetyt elementtityypit toisiinsa. Elementtiverkon tiheyttä voidaan tarvittaessa muuttaa laskentatulosten ja laskenta-ajan muuttamiseksi. (Lumijärvi, 2018) (Jaakkola, 2011).

3.4 Lineaarisen rakenneanalyysin vaiheet

Pienten siirtymien ja lineaarisen materiaalmallin tapauksessa rakenneanalyysin vaiheet on kuvattu kuvassa 9. Ensimmäisen kertaluvun menetelmä soveltuu rakenteille, joiden

siirtymät pysyvät pieninä, sillä siirtymien vaikutus kuormitusten kokonaisjakautumiseen on pieni, jolloin voidaan laskennassa hyödyntää superpositioperiaatetta, jonka mukaan lineaarisen systeemin vaste on summa yksittäisten osatekijöiden vasteista. Siirtymien kasvaessa tulee niiden vaikutus rakenteen jäykkyyteen huomioda laskennassa, jolloin laskenta tehdään toisen kertaluvun menetelmällä. (Lumijärvi, 2018) (Jaakkola, 2011).

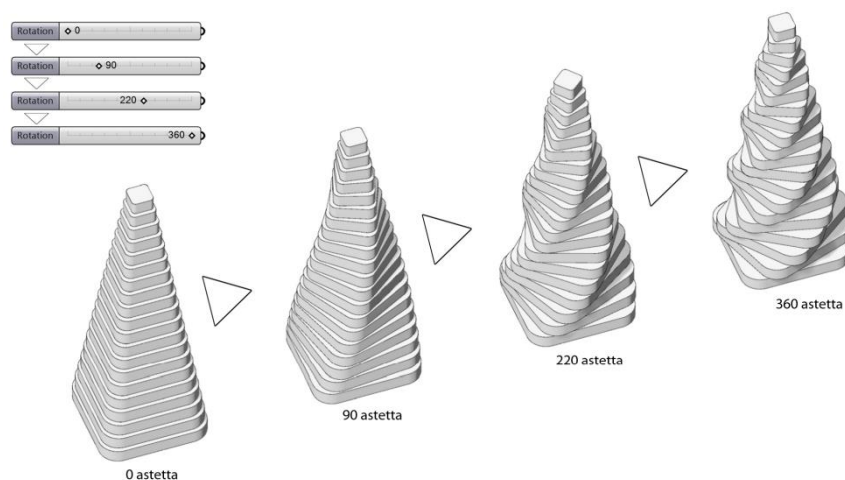


Kuva 9. Ensimmäisen kertaluvun mukainen lineaarinen numeerinen laskentatapa (Lumijärvi, 2018).

4 PARAMETRINEN SUUNNITTELU

Parametri on määritelty lukuarvo, muuttuja tai määre, jonka perusteella sarja ennalta määriteltyjä tehtäviä suorittaa aina tarkalleen saman prosessin annettujen ehtojen mukaisesti. Yksityiskohtaisesti ja ennalta määriteltyjä tehtäviä kutsutaan algoritmeiksi. Parametri voi olla esimerkiksi geometriakoordinaatti, kuormitustieto tai vaikka betonin puristuslujuus. Parametrien avulla voitaisiin esimerkiksi määritellä algoritmi, joka määrittää yksittäisen rakenneosan vaadittavan pinta-alan normaalivoiman suhteen. Lähtöparametri voi olla siis esimerkiksi laskennan lähtöarvo. Rakennesuunnittelussa parametri voi olla esimerkiksi kerrosluku tai kerroskorkeus. (Tanska & Österlund 2014, p. 11-13).

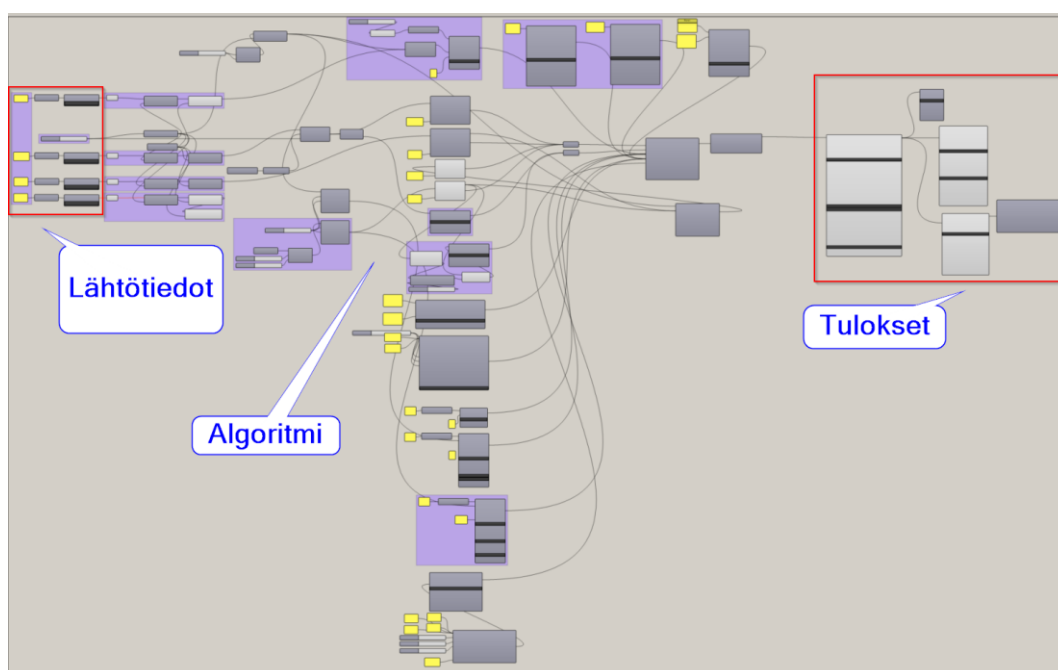
Parametrinen mallinnus perustuu riippuvuussuhteiden luomiseen lähtöparametrien ja geometrisen mallin välille. Geometrinen malli rakentuu pala palalta tietyn tapahtumaketjun ja reunaehtojen avulla. Tapahtumaketjussa eli algoritmossa, jokaisella tapahtumalla on lähtö- ja loppuarvo. Lähtöarvon perusteella suoritetaan tapahtuma ja loppuarvo on seuraavan tapahtuman lähtöarvo tai koko prosessin lopputulos. Kuvassa 10 on geometrinen malli, joka on luotu parametrisesti. Yhden tason käänös on aina yksi osatapahtuma ja lähtöparametrina kääntökulma. Tason lähtökulma on riippuvainen edellisen tason kulmasta. Näin muodostuu riippuvuussuhde jokaisen tason kääntökulman ja koko geometrisen mallin välille. Reunaehtoina toimivat tässä tapauksessa mallin korkeus sekä kappaleiden lukumäärä. (Tanska & Österlund 2014, p. 13, 26.)



Kuva 10. Parametrisella mallintamisella luotu geometria. (Tanska & Österlund 2014, p. 27).

Käsitettä ”parametrinen mallinnus” käytetään kuvaamaan mallinnustapaa, jossa luodaan parametrien ja algoritmien avulla geometrinen malli. Käytettäessä parametrejä ja algoritmeja rakenteiden mitoituksessa, soveltuu käsite ”parametrinen suunnittelu” paremmin kuvaamaan kyseistä prosessia. Usein parametrinen suunnittelu ja mallintamisen yhteydessä puhutaan myös algoritmiavusteisesta suunnittelusta sekä mallintamisesta. Parametrinen suunnittelu ja mallintaminen ovat osa algoritmiavusteista suunnittelua ja mallintamista. Algoritmiavusteinen suunnittelu ja mallintaminen korostaa suunnittelun ja mallin toteuttamista algoritmien avulla. Puhuttaessa parametriseista suunnittelusta ja mallintamisesta painotetaan suunnittelun muutosmahdollisuutta parametrien avulla, jota tässä työssä juurikin käsitellään.

Parametrisella suunnittelulla ja mallintamisella tarkoitetaan tässä työssä visuaalista skriptauksta, jossa perinteisen tekstimuotoisen ohjelmakoodin kirjoittamisen sijasta käytetään visuaalisia ohjelmakomponentteja. Jokainen ohjelmakomponentti suorittaa tietyn tapahtumaketjun ja komponentit linkitetään toisiinsa visuaalisten linkkien avulla. Kuvan 11 harmaat ja valkoiset laatikot edustavat ohjelmakomponentteja ja narut visuaalisia linkkejä komponenttien välillä. Linkitetty ohjelmakomponentit luovat yhdessä algoritmin eli tapahtumaketjun, joka tuottaa aina tietyn lopputulokset lähtöparametrien avulla. Parametrisesta suunnittelusta tekee tehokasta lähtöarvojen muuttamisen ja lopputulosten suhde. Ennalta määritettyjen algoritmien ansiosta tulokset päivittyvät reaaliajassa lähtöparametreja muuttamalla. (Tanska & Österlund 2014, p. 13, 25).



Kuva 11. Parametrinen mallintaminen Grasshopperilla.

```

1  import rhinoscriptsyntax as rs
2  import Rhino as rh
3  import System as sys
4  import scriptcontext as sc
5
6  """ S
7  Split Brep plane 2012,
8  by Arie-Willem de Jongh
9  """
10
11
12  arrBrep = []
13  arrBrep.append(brp)
14
15  if brp and Cutters:
16      for i in Cutters:
17          arrBrepC = arrBrep[:]
18          for j in arrBrepC:
19              brep = rs.coercebrep(j)
20              tbrep = brep.Split(i,0.001)
21              if tbrep:
22                  arrBrep.remove(j)
23                  for k in tbrep:
24                      arrBrep.append(k)
25
26  pieces = arrBrep

```

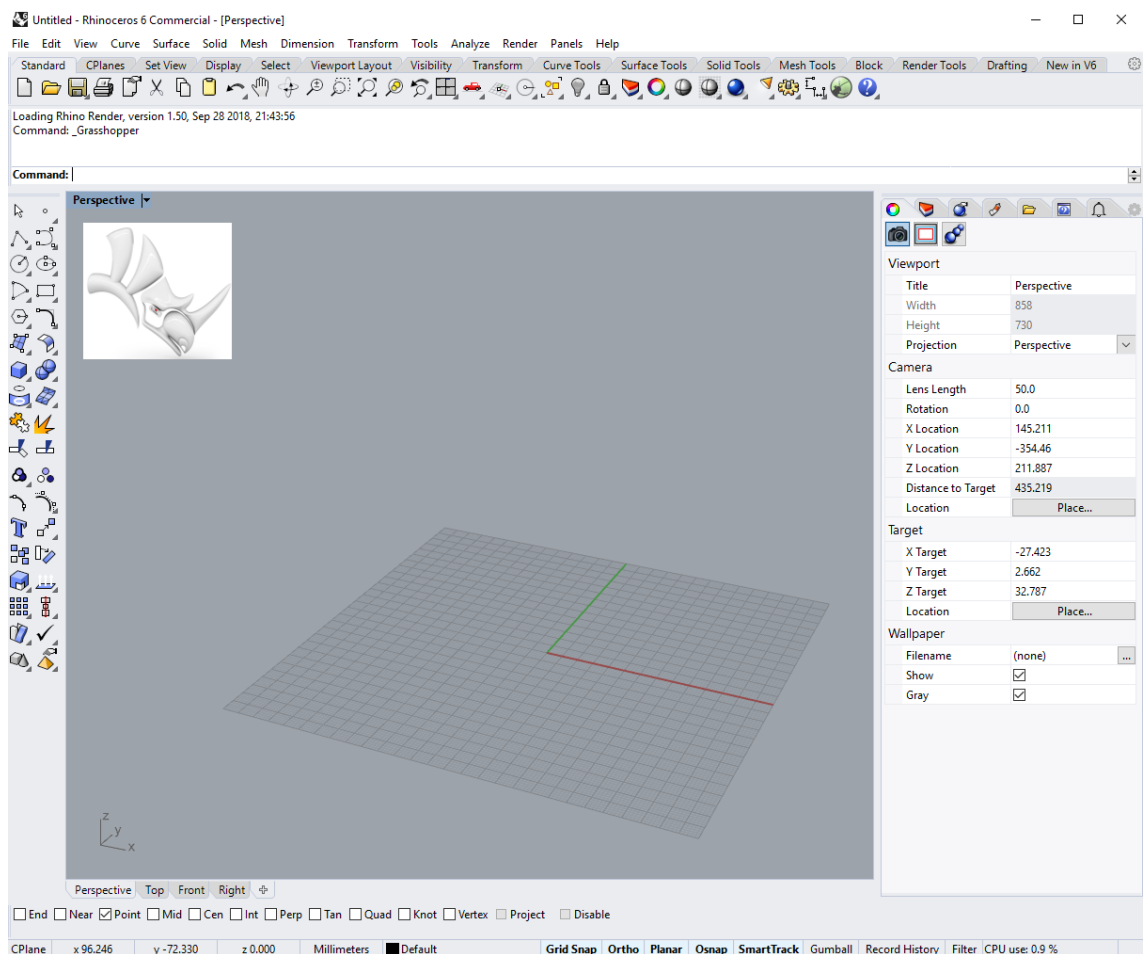
Kuva 12. Perinteistä tekstimuotoista ohjelmointia.

Perinteinen tekstimuotoinen ohjelmointi päivittää lopputulokset käyttäjän suorittaessa laskennan uusiksi. Tämä tekee virheiden paikantamisesta sekä vaihtoehtojen vertailusta haastavampaa kuin visuaalisessa ohjelmoinnissa, sillä parametrinen malli päivittyy dynaamisesti ja reaaliajassa. (Tanska & Österlund 2014, p. 25). Parametrisen mallin reaaliajassa päivittyminen helpottaa mahdollisten virheiden havainnollistamista. Virheiden havainnollistaminen laskee kynnystä visuaalisen ohjelmakoodin luomiseen myös sellaiselta henkilöltä, joka ei ole perinteiseen ohjelmakoodin kirjoittamiseen perehtynyt. Lisäksi dynaamisesti päivittyvä malli helpottaa vaihtoehtojen nopeaa vertailua.

Visuaalinen ohjelmakoodi muodostuu ohjelmakomponenteista, jotka sisältävät perinteistä tekstimuotoista ohjelmakoodia. Visuaalisen ohjelmakoodin kirjoittaminen on uusi tapa luoda ohjelmakoodia, mutta se ei korvaa perinteisiä menetelmiä. Valmiita ohjelmakomponentteja on luotu ohjelmistoissa yleisimmin käytettyihin toimintoihin, mutta kaikkia toimintoja ei voida luoda valmiiksi. Tämän vuoksi visuaalisen ohjelmakoodin avuksi voidaan kirjoittaa samaan ympäristöön tekstimuotoista ohjelmakoodia. Tällöin puhutaan skriptauksesta. Käytettävissä on muuan muassa ohjelmistokielet VB.net, C# ja Python. (Tanska & Österlund 2014, p. 31). (Tanska & Österlund 2014, p. 13.)

4.1 Rhinoceros 3D ja Grasshopper

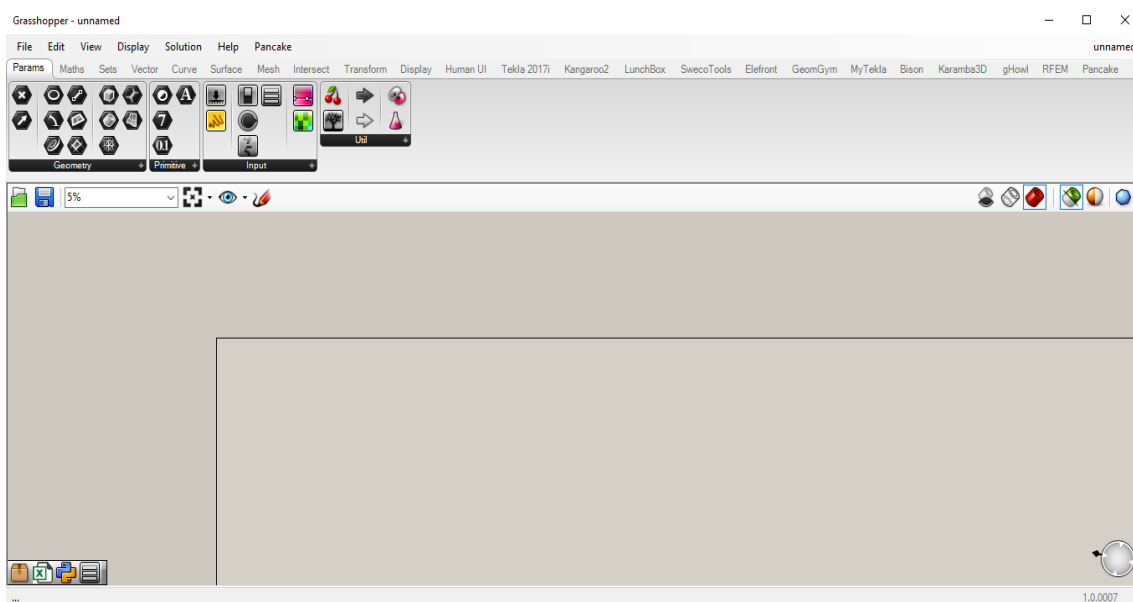
Työssä käytettävään ohjelmistokokonaisuuteen kuulu McNeel Rhinoceros3D, joka on yleisemmin puhekielessä tunnettu nimellä Rhino. Ohjelma on helppokäyttöinen ja suosittu ja se soveltuu hyvin monimutkaisten NURBS-pintojen ja -viivojen kolmiulotteiseen mallintamiseen. Rhino soveltuukin hyvin arkkitehtien työkaluksi monimuotoisten kolmiulotteisten muotojen luomisen ansiosta. Ohjelma on itsessään melko yksinkertainen, mutta se on helposti lisäosilla muokattavissa soveltumaan haastaviinkin tarkoituksiin. (Tanska & Österlund 2014, p. 30.) Rhinoon voidaan tuoda lähtögeometriaa muun muassa dwg-tiedostojen muodossa. Uusin Rhinon versio 6 on ladattavissa ohjelmiston kotisivuilta ja käytettävissä on 90 päivän kokeiluversio, jonka jälkeen talletus ja lisäosa lakkaavat toimimasta, ellei käytössä ole lisenssiavainta. Lisenssiavain voidaan hankkia ohjelmiston kotisivuilta ja se on arvoltaan noin tuhannen euron arvoinen.



Kuva 13. Rhinon näkymäikkuna.

Työssä tutkitaan parametrista suunnittelua ja siihen käytettävä ohjelma on yksi Rhinon lisäosa nimeltään Grasshopper. Kyseinen lisäosa tulee uusimman Rhino 6 asennuksen mukana ja on ladattavissa vanhempiin versioihin ilmaiseksi verkosta. Lisäosa käynnistetään Rhinon näkymäikkunasta (kuva 13).

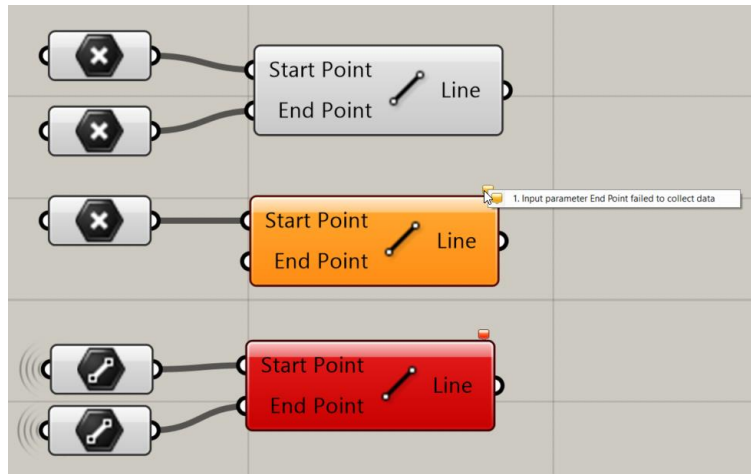
Grasshopper on visuaaliseen skriptaukseen pohjautuva työkalu, jolla parametrinen malli luodaan visuaalisesti linkittämällä valmiita ohjelmakomponentteja toisiinsa. Ohjelmakomponenteilla on jokaisella tietty toiminto, joka voi olla esimerkiksi kuvassa 7 näkyvän geometrian luonti tai tason pyörittäminen tietyn asteluvun verran. Ohjelmakomponentteja on satoja erilaisia, joilla voidaan muodostaa lukuisia erilaisia variaatioita esimerkiksi erittäin hankalien geometrysten muotojen mallintamiseksi. (Tanska & Österlund 2014, p. 30.) Grasshopperin näkymäikkunassa (kuva 14) yhdistetyt ohjelmakomponentit muodostavat geometrisia malleja, jotka mallintuvat Rhinon näkymään reaaliajassa. Grasshopperin puolella voidaan muokata myös Rhinon näkymäasetuksia.



Kuva 14. Grasshopperin näkymäikkuna.

Parametrinen suunnittelu Grasshopperilla on reaaliaikaista, kuten edellä mainittiin. Grasshopperin ohjelmakomponentit ilmoittavat toiminnoistaan värikoodeilla. Harmaa tarkoittaa komponenttia, joka toimii oikealla tavalla. Oranssi edustaa komponenttia, jolla ei ole tarvittava määrä informaatiota toimiakseen tai, joka ei hyödynnä kaikkea informaatiota tai ilmoittaa mahdollisesta ongelmasta, joka tulee ottaa huomioon. Esimerkiksi kuvan x oranssi komponentti ilmoittaa ongelmastaan kerätä viivan

mallintamiseen vaadittuja päätepisteitä. Punainen väri ilmoittaa komponentin toimintahäiriöstä, joka voi johtua esimerkiksi virheellisen datan syöttämisestä. Kuvan 15 viivanluontikomponentti on punaisella, koska siihen on yritetty syöttää alku- ja päätepisteiden tilalle lähtögeometriaa viivojen muodossa.



Kuva 15. Grasshopperin värikoodit.

Grasshopper ei ole varsinaisesti rakennesuunnittelun tarpeisiin kehitetty ohjelmisto. Grasshopperin valmiit ohjelmakomponentit ovat lähinnä tarkoitettu palvelemaan Rhinon kolmiulotteisen geometriamallin luomista. Valmiin ohjelmistokomponenttivalikoiman lisäksi Grasshopperiin on mahdollista lisätä kolmannen osapuolen kehittämiä komponentteja, joilla voidaan esimerkiksi laajentaa rakennemallia toimimaan myös samanaikaisesti rakenteiden mitoitukseen toimivana laskentamallina.

4.2 Karamba 3D

Karamba 3D on kolmannen osapuolen kehittämä FEM-laskentaohjelma monien muiden laskentaohjelmien tavoin, mutta sillä on monia huomattavia etuja vastaaviin ohjelmiin verrattuna. Karamba 3D on täysin sisällytetty Grasshopperin parametriseen ympäristöön (Karamba User Manual, 2018). Tämä mahdollistaa Grasshopperilla luodun rakennemallin laajentamisen samanaikaisesti laskentamalliksi. Edellinen lause kiteyttää parametrisen mallinnuksen hyödyt. Linkitettäessä rakennemalli ja laskentamalli toisiinsa, vähennetään molempien mallien luomiseen käytettävää aikaa sekä kyseisten mallien välisiä ristiriitoja. Karamba 3D on ladattavissa verkosta ja on käytettävissä kokeiluversiona, jonka toimintoja on rajoitettu rakennemallin laajuuteen liittyen.

Ohjelmiston käyttölisenssi on ostettavissa samalta sivulta. Karamban ohjelmakomponenttivalikoima Grasshopperin näkymässä on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Karamba 3D työkalut Grasshopperin ympäristössä.

4.2.1 Karamban puutteellisuudet ja yksinkertaistukset

Karamba 3D soveltuu hyvin teräsrakenteiden mitoitukseen sen sauvamallimaisen toimintansa ansiosta. Betonirakenteisen laskentamallin luomisessa on omat haasteensa esimerkiksi seinätukien ja tasojen välisten vapautusten mallintamisessa. Myös tulosten tarkastelu on isolla laskentamallilla kömpelöä. Edellä mainitut haasteet tulevat vastaan kappaleessa 6, jossa sovelletaan kappaleessa 5 esiteltyä, luonnossuunnitteluun luotua laskentapohjaa tutkimuskohteeseen.

Karamban käyttöön liittyy tiettyjä yksinkertaistuksia ja rajoituksia, jotka tulee ottaa huomioon työtä suoritettaessa. Mäenpään (2018) työssä on eritelty lisää puutteellisuuksia sekä yksinkertaistuksia, mutta tässä työssä on listattu tämän työn kannalta oleelliset kohdat. Seuraavat puutteellisuudet perustuvat ohjelman käyttöohjeisiin sekä Mäenpään diplomityöhön. (Karamba 3D User Manual, 2018: 5) (Mäenpää, 2018)

- Karambassa ei voi luoda kuormitusyhdistelmiä, vaan ne on määriteltävä suoraan kuormitustapauksissa.
- Viivatuentaa ei voi määrittää, kuten vastaavissa laskentaohjelmissa, vaan esimerkiksi seinän tukemiseksi koko matkalta on poimittava kyseisen rakenteen elementtiverkon alimmat pisteet ja määriteltävä tuennat näihin pisteisiin.
- Tasojen välisiä vapautuksia ei voi mallintaa yhtä komponenttia käyttämällä kuten ohjelmassa pystyy sauvojen väliset vapautukset toteuttamaan. Tasojen väliset vapautukset on toteutettava mallintamalla liitospisteisiin äärettömän lyhyet jouset, joiden jousivakiot määritellään halutun suunnan vapauttamiseksi hyvin pieneksi.
- Pistekuormituksia voi mallintaa pelkästään elementtiverkon solmupisteisiin.

4.3 Grasshopper-Tekla Live Link

Grasshopper-Tekla Live Link on Trimble Solutions Oy:n kehittämä automaattinen linkki Grasshopperin ja Tekla Structuresin välille. Linkki mahdollistaa parametrinen mallin laajentamisen myös Teklan puolelle. Teklan käyttöliittymä voidaan käytännössä rakentaa Grasshopperin puolelle kuvan 17 työkaluilla. Ohjelmistojen välinen yhteys toimii dynaamisesti eli reaaliajassa lähtöparametreja muuttamalla. Tekla Live Link on ladattavissa verkosta (Grasshopper-Tekla Live Link 2017.)

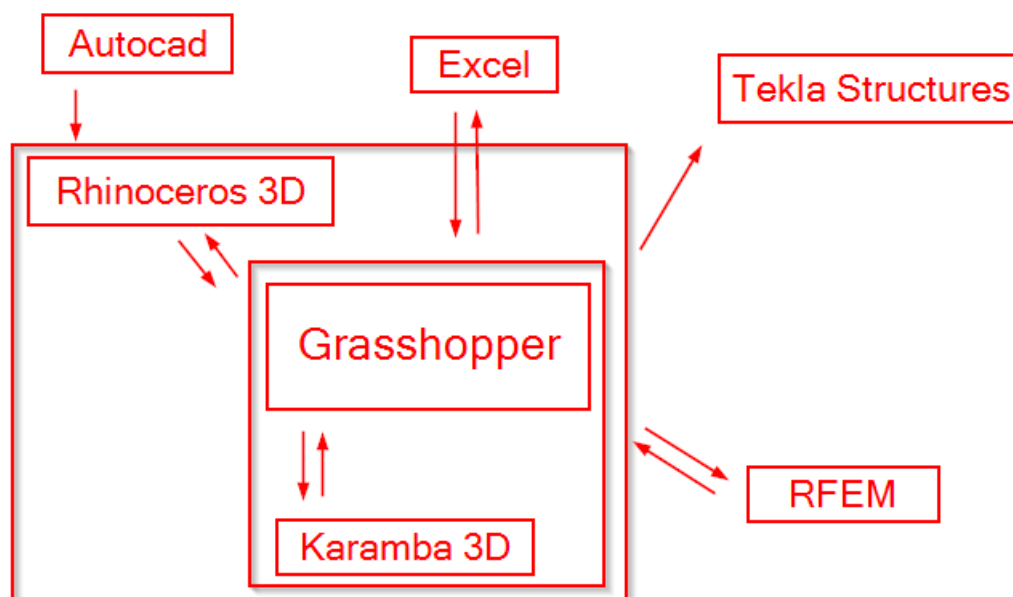


Kuva 17. Grasshopper-Tekla Live Link -työkaluluettelo.

Parametrinen malli voidaan viedä Teklaan linkin avulla, mutta sitä ei käsitellä tässä työssä. Betonirakenteisen rungon kantavien ja jäykistävien rakenneosien linkitys Teklaan on suoraviivaista ja voidaan helposti toteuttaa hankekohtaisesti jatkossa. Grasshopper-Tekla Live Linkin ominaisuuksia ja sovellutuksia on esitetty laajemmin Erkkilän (2017) diplomityössä. Erkkilä tutkii työssään betonirakenteisen väliseinäelementin mallintamista algoritmiavusteisilla menetelmillä. Työssä hyödynnetään Teklan linkkiä väliseinäelementtien mallintamiseen ja detaljointiin. Työssä on avattu tarkemmin Grasshopperin ja Teklan välisen linkityksen ominaisuuksia ja ongelmia.

4.4 Ohjelmistojen yhteys toisiinsa

Kaikki edellä mainitut ohjelmat ovat yhteydessä toisiinsa kuvan 18 mukaan. Koko toiminta perustuu Grasshopperin visuaaliseen skriptaukseen, jonka sisällä voidaan muodostaa algoritmeja ohjelmakomponenteilla. Kuten edellä mainittiin, Grasshopper on Rhinon lisäosa, jonka ympäristössä se toimii. Karamba 3D ja muut kolmannen osapuolen kehittämät ohjelmistot toimivat Grasshopperin sisällä. Grasshopperiin on lisäksi mahdollista liittää excel-tiedostoja informaation tuomiseen ja viemiseen. Excelin linkitystä ei käsitellä tarkemmin tässä työssä. Grasshopperin muodostama parametrinen malli on linkitettävissä Teklaan sekä muihin FEM-laskentaohjelmiin kuten RFEMiin.



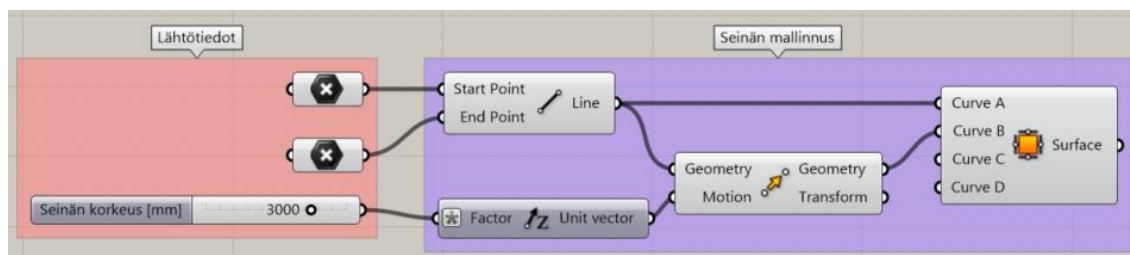
Kuva 18. Ohjelmistojen yhteys toisiinsa.

4.5 Parametrinen mallin luominen algoritmiavusteisesti

Parametrinen malli luodaan algoritmiavusteisesti visuaalisilla ohjelmakomponenteilla. Erona perinteiseen ohjelmakoodin kirjoittamiseen on edellä mainittujen seikkojen lisäksi ohjelmakomponenttien vapaa sijoittelu. Grasshopperissa on kuvan 14 mukainen näkymä, johon ohjelmakomponentteja voidaan sijoittaa vapaasti. Perinteinen ohjelmakoodi kirjoitetaan riveittäin kuvan 12 mukaisesti, joten se on selkeää ja helposti muokattavissa myös ulkopuolisen henkilön toimesta. Visuaalinen ohjelmakoodi muodostuu helposti liian sekavaksi koodin laajentuessa.

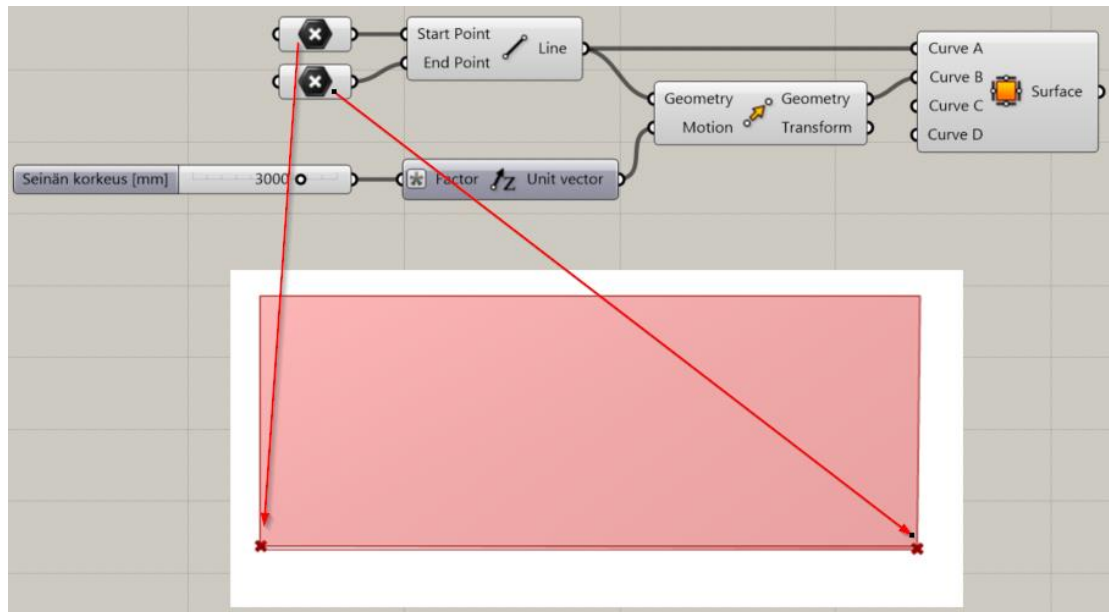
Davis esittelee tohtorintyössään (2013, p-136-142) tutkimusta visuaalisen ohjelmakoodin hallitsemiseen liittyen, joka suoritettiin neljälle arkkitehtiopiskelijalle. Opiskelijat valittiin sattumanvaraisesti 25 oppilaan luokasta. Kaikilla opiskelijoilla oli yhdestä seitsemään vuotta kokemusta tietokoneavusteisesta suunnittelusta ja vuoden kokemus Grasshopperin käytöstä. Jokaiselle näytettiin kolme eri mallia Grasshopperin ympäristössä. Kaksi kolmesta mallista olivat lähes samanlaisia ja suorittivat saman toiminnon, mutta ne oli rakennettu eri tavalla näkymään. Yksikään opiskelija ei huomannut tarkastelevansa kahta samanlaista mallia kolmen mallin joukosta. Tutkimuksen yhtenä lopputuloksena oli, että selvemmin rakennettu ohjelmakoodi on

paremmin ymmärrettävissä vaikkakin se olisi laajuudeltaan suurempi. Muita seikkoja, jotka vaikuttivat ohjelmakoodin ymmärrettävyyteen, olivat muun muassa ohjelmakomponenttien nimeäminen, sijoittelu, ryhmittely. Kuvassa 19 on ryhmitelty lähtötiedot sekä seinän mallinnukseen tarvittavat ohjelmakomponentit.

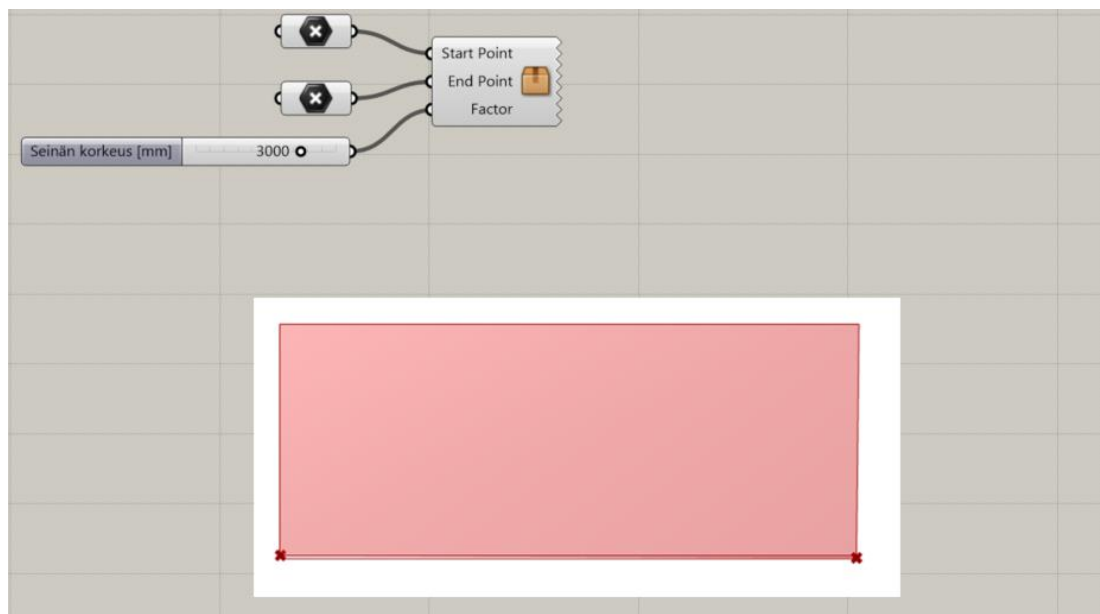


Kuva 19. Visuaalisen ohjelmakoodin selkeytys ryhmittelemällä ja nimeämällä.

Visuaalista ohjelmakoodia voidaan myös selkeyttää rakentamalla tiedon kulku pääosin kulkemaan vasemmalta oikealle. Lisäksi voidaan muokata ohjelmakomponenttien välisiä ”lankoja” eli yhteyksiä näkymään eri tavalla tai piilottaa ne kokonaan. Ryhmästä komponentteja voidaan myös muodostaa klustereita eli ryhmiä, jotka sijoittuvat näkymään yhden ohjelmakomponentin taakse. Esimerkkinä seinän mallintaminen kahden määritetyn pisteen perusteella, kerroskorkeus parametrisoituna. Kuvien 20 ja 21 algoritmit suorittavat saman seinän mallintamisen samojen komponenttien avulla. Esimerkin selkeyden vuoksi klusteri luotiin muutamalle komponentille. Sama toimenpide voidaan suorittaa myös suurelle komponenttimäärälle vastaavalla tavalla. Klustereiden symboleita voidaan muokata erilaisiksi selkeyttämisen vuoksi sekä muokata syötettävien lähtötietojen määrää. Lisäksi voidaan määrittää mitä tietoja klusterista tuodaan ulos. Esimerkiksi kuvan 19 seinän geometria ”Surface” voitaisiin lisätä klusterista lähteviksi tiedoiksi.



Kuva 20. Seinän mallintaminen kahden alimman nurkkapisteen mukaan.



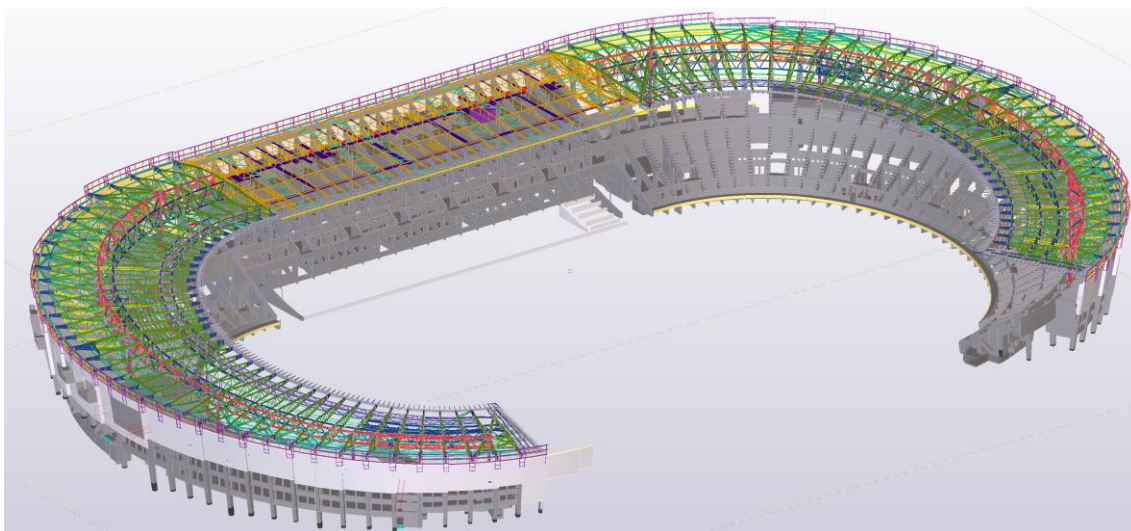
Kuva 21. Klusteri seinien mallinnuskomponenteista.

4.6 Sovellutukset rakennesuunnittelussa

Parametrinen suunnittelu ja mallintaminen hyödynnetään enemmän arkkitehtien keskuudessa sen monimutkaisten muotojen mallinnushelpouden ansiosta. Suosio on kuitenkin noussut lähivuosien aikana myös rakennesuunnittelijoiden keskuudessa hyvin huomattavasti. Aihealue on varsin uusi ja alan ohjelmistot kehittyvät kovaa vauhtia. Aiheesta on teetätetty muutamia opinnäytetöitä eri yritysten toimesta. Sovellutuksia

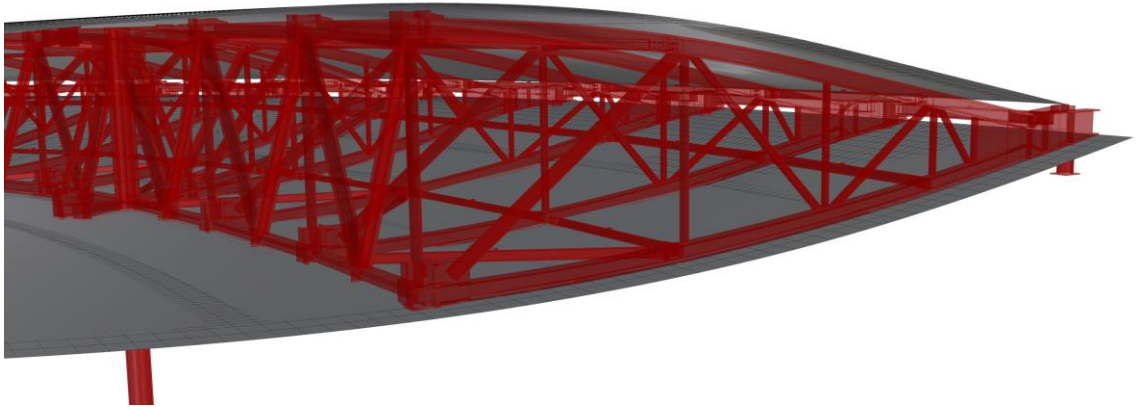
löytyy muun muassa betonielementtiväliseinien mallinnukseen (Erkkilä, 2017) sekä teräsrakenteisen varastorakennuksen mitoitukseen (Mäenpää, 2018). Sovellutusta betonirakenteiden parametriseen suunnitteluun löytyy siltarakenteiden puolelta, mutta talonrakennuksen puolelta aihealue on vielä osittain tuntematon.

Olympiastadionin katsomokatosten teräsrakenteiden (kuva 22) suunnittelussa on hyödynnetty parametristä sekä algoritmiavusteista suunnittelua. Algoritmiavusteista suunnittelua päädyttiin soveltamaan hankkeeseen muun muassa haastavan arkkitehtuurisen muodon vuoksi. Rakenteiden mitoittamisen kannalta haasteiksi osoittautuivat muun muassa laskentamallin suuri koko ja teräsrakenteiden liittyminen olemassa oleviin rakenteisiin. Rakenteiden mitoituksessa hyödynnettiin optimointialgoritmeja, joiden avulla kyettiin suunnittelemaan kustannustehokkaita rakenneratkaisuja. Algoritmiavusteinen suunnittelu lisäsi hankkeen suunnittelutarkkuutta ja pienensi valmistuskustannuksia optimoinnin ansiosta. Olympiastadionin teräsrakenteiden suunnittelussa parametrisoitiin muuttujia kuten ulokkeiden pituuksia, poikkileikkauksia sekä teräsrakenteiden määriä moduulilinjoiittain. (Forsman, 2019.)



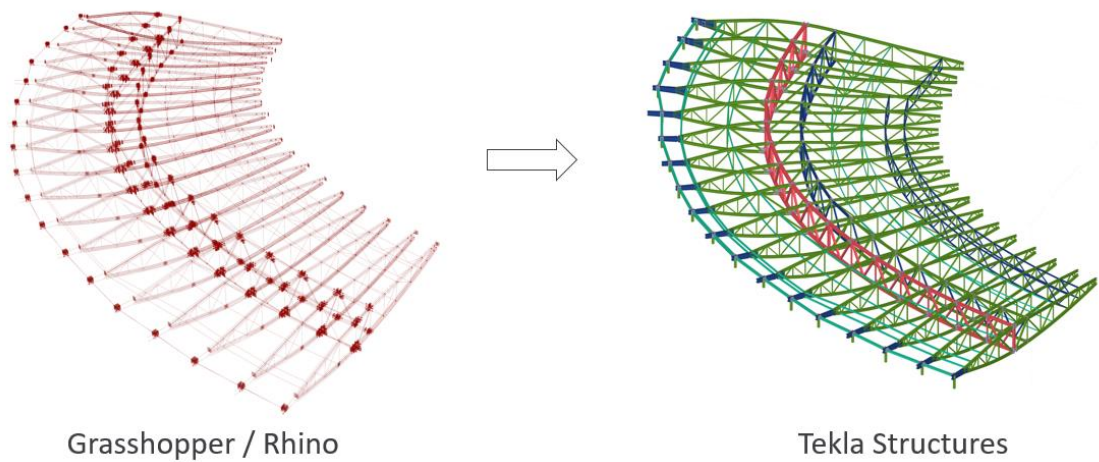
Kuva 22. Olympiastadionin katsomokatosten teräsrakenteet. (Forsman, 2019).

Teräsristikot mallinnettiin projisointialgoritmien avulla arkkitehdin pintamallin sisään (kuva 23). Pintamallin rajapintojen mukaiset rakenneosat rajattiin koostumaan ainoastaan suorista ja vakiosäteellä taivutetuista osista. Rajausten avulla yksinkertaistettiin huomattavasti rakenneosien valmistamista. (Forsman, 2019.)



Kuva 23. Arkkitehdin pintamallin sisään mallinnetut teräsrakenteet (Forsman, 2019).

Tyypiliitosten perusteella laadittujen mallinnusskriptien avulla asetettiin aiemmin generoidun datan ja lähtöparametrien välille riippuvuussuhteita ja reunaehtoja, joiden perusteella rakenteiden liitokset mallinnettiin. Menetelmä mahdollisti tarkan liitosgeometrian luomisen, teräsrakenteiden muuttuvasta geometriasta ja kaarevuudesta huolimatta. Parametrinen malli linkitettiin Teklaan kuvan 24 mukaisesti. (Forsman, 2019.)



Kuva 24. Teräsrakenteet vietiin live linkin avulla Teklaan (Forsman, 2019).

4.7 Parametrinen suunnittelun mahdollisuudet

Olympiastadionin katsomokatosten teräsrakenteiden algoritmiavusteinen suunnittelu on loistava esimerkki siitä, mitä suunnittelun parametrisoinnilla voidaan saavuttaa. Lähtötietojen parametrisoinnilla voidaan toteuttaa suunnittelua täysivaltaisesti ilman lopullisia lähtötietoja. Lisäksi voidaan tutkia useita eri vaihtoehtoja ja löytää kustannustehokkain rakenneratkaisu optimointialgoritmien avulla.

Parametrinen suunnittelu luo hyvät edellytykset rakenteiden optimoinnille, kun lähtöparametrien ja parametrin mallin välille on asetettu riippuvuussuhteet. Parametrinen suunnittelu on ikään kuin seuraava askel nykyisin käytettävissä olevista rakenteiden mitoitusliittymistä laskentapohjista. Laskentapohjien käyttö mahdollistaa yksittäisen rakenneosan lähtöparametrien optimoimisen, kun tulosten muutos nähdään reaaliajassa. Parametrilla suunnittelulla kyseinen toiminto voidaan laajentaa suurempaan mittakaavaan, kun kaikkien yksittäisten rakenneosien lähtöparametrien ja koko rakenteen laskentamallin välille on luotu riippuvuussuhteet.

4.8 Parametrinen suunnittelun hyödyntäminen teräsbetonisten runkojen luonnossuunnittelussa

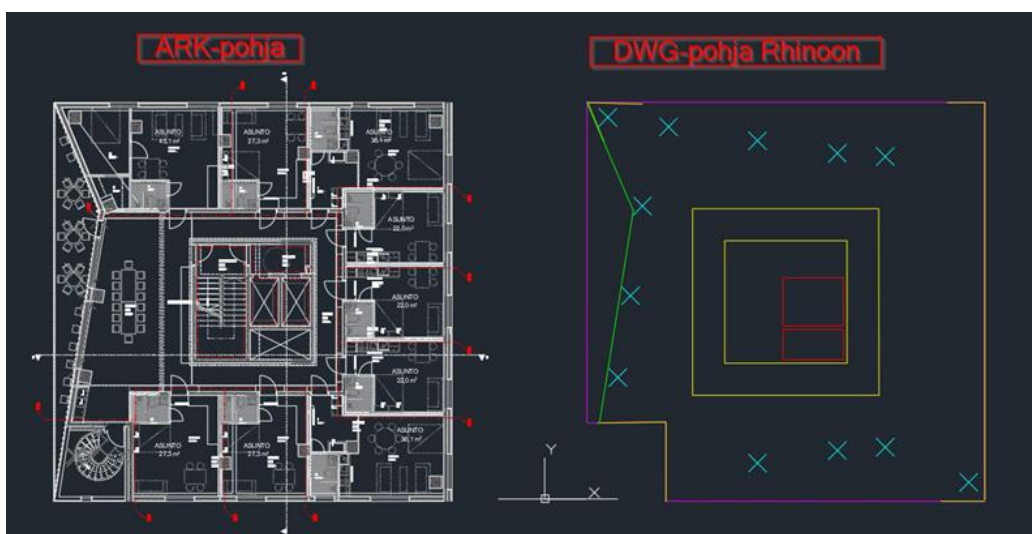
Kappaleessa 2 esiteltiin betonirakenteisen rungon luonnossuunnitteluun liittyviä seikkoja. Kohdassa 2.6 eritellään luonnossuunnitteluvaiheen eri osa-alueita. Tässä työssä tutkitaan parametrin mallintamisen hyödynnettävyyttä käytännössä osavaiheisiin 7-9. Hyödyntämisellä voidaan ajatella optimaalisen runko- ja jäykistysjärjestelmän havainnollistamista sekä rakenteiden nimellismittojen optimointia ja tätä kautta kustannusten minimoimista. Lisäksi hyödyntämistä voidaan ajatella suunnittelu-aikaa vähentävänä tekijänä. Molemmat edellä mainitut seikat otettiin huomioon työn tutkimusosuutta tehdessä, joiden pohjalta luotiin seuraavassa kappaleessa esitetty laskentapohja.

5 LUONNOSSUUNNITTELUUN LUOTU LASKENTAPOHJA

Työssä aiemmin esitettyjen alustavien mitoitussehtojen perusteella luotiin Grasshopperilla laskentapohja betonirakenteisten runkojen luonnossuunnitteluun. Työn yhteydessä luotiin myös erilliset käyttöohjeet ohjelmistojen asentamiseen sekä pohjan käyttöön. Laskentapohja suorittaa rakenneosien alustavien poikkileikkausten mitoittamisen sekä muodostaa mitoistulosten perusteella parametrisen 3D-mallin, jota voidaan tarkastella Rhinon puolella. Laskentapohja mitoittaa myös perustuskuormat ja laskee käyttörajatilan mukaisten kuormitusyhdistelmien siirtymät rakenteelle. Laskentapohjalla saatujen tulosten tarkastelu on esitetty kappaleessa 7.

5.1 Parametrisen mallin muodostaminen

Parametrisen mallin lähtögeometria muodostetaan Autocadilla kaksiulotteisesti. Eri rakenneosien luokitteluun soveltuu hyvin Autocadin puolella määritettävät layerit. Parametrinen malli luodaan laskentamallin käyttötarpeita ajatellen, jolloin malliin otetaan mukaan ainoastaan primäärirakenteet eli rakennusta jäykistävät ja kantavat rakenteet. Parametrisen mallin lähtögeometrian luominen arkkitehdin kuvien pohjalta on kuvateknisesti helppo toteuttaa piirtämällä kantavat linjat oikeisiin kohtiin, mutta itse kantavien linjojen määrittely vaatii ammattitaitoa, jotta voidaan muodostaa järkevä ja toimiva runkojärjestelmä.



Kuva 25. Dwg-tiedoston luominen rakennuksen pohjapiirustuksen perusteella.

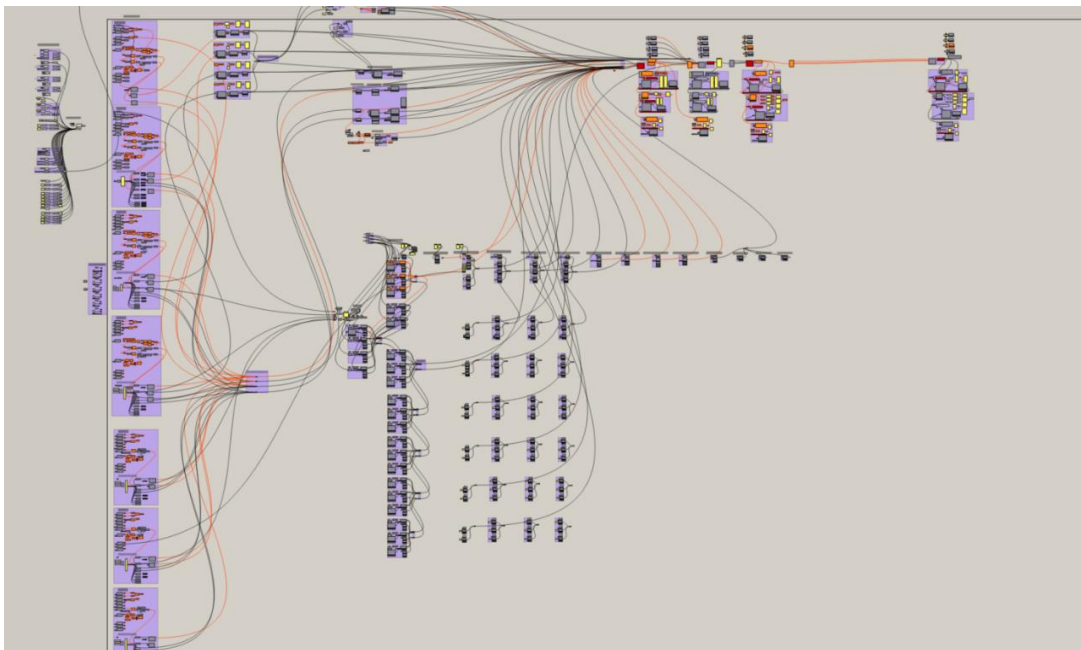
5.2 Lähtöparametrit ja käyttöliittymä

Parametriselle mallille tulee määrittää lähtöparametrit. Alustaviksi lähtöparametreiksi valittiin sellaisia lähtötietoja, joiden todettiin muuttuvan useimmiten kohteiden välillä sekä yksittäisen hankkeen aikana. Lähtöparametreiksi asetettiin muun muassa:

- Pohjapiirustukset
- Kerroskorkeus ja kerrosluku
- Kuormitukset
- Betonin lujuusluokka rakenneosakohtaisesti
- Laskennan suorittava kuormitusyhdistelmä
- Rakenneosien osavarmuuskertoimet
- Elementtiverkon tiheys
- Ikkunoiden koko ja korkoasema
- Välipohjan paksuus.

Lähtötiedoissa voidaan valita, montako kerrosta kyseisellä dwg-tiedostolla halutaan muodostaa sekä säätää kyseisten kerrosten kerroskorkeutta. Lisäksi voidaan muokata näkymäasetuksia. Lähtöparametreja voidaan lisätä jatkossa hankekohtaisesti.

5.3 Runkoluonnossuunnitteluun luotu algoritmi



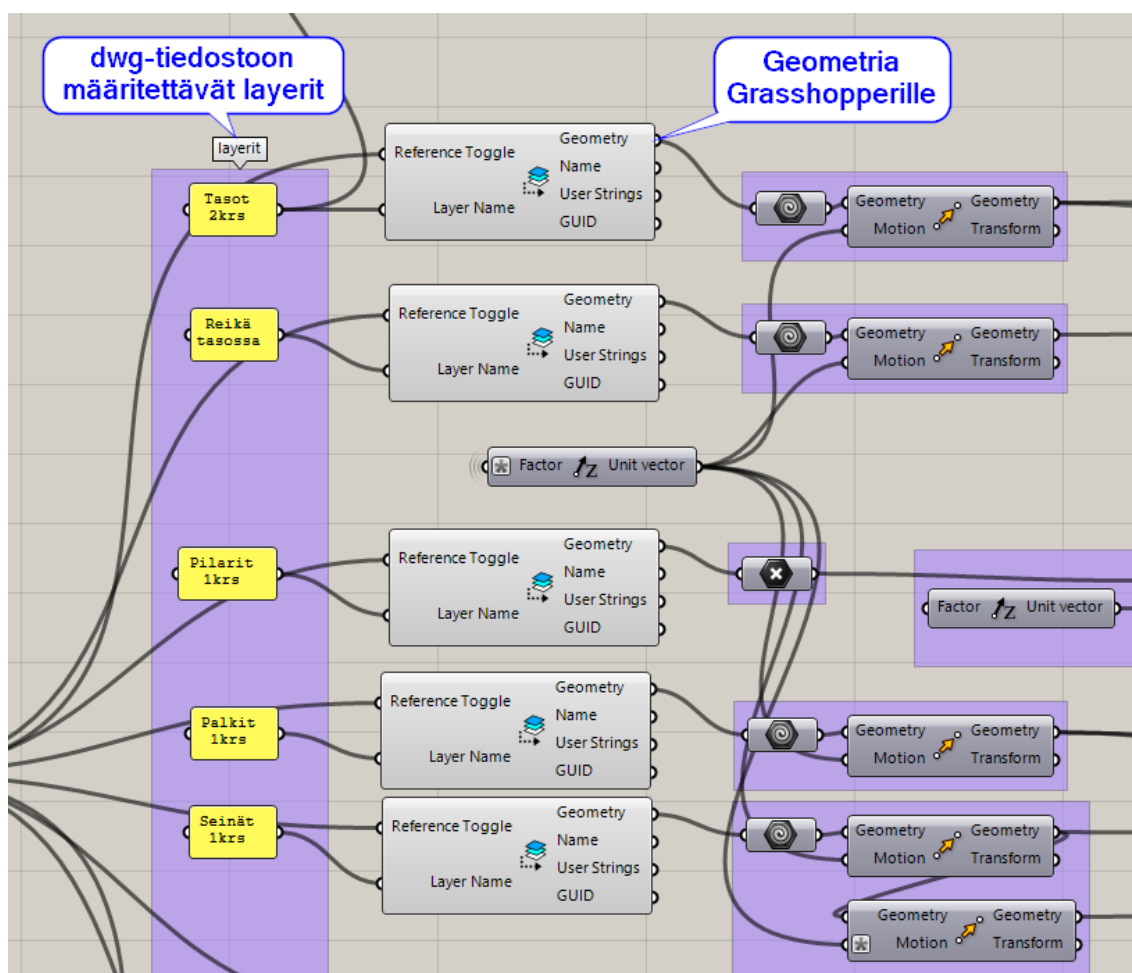
Kuva 26. Runkoluonnossuunnitteluun luotu algoritmi kokonaisuutena.

Betonirakenteisten runkojen luonnossuunnitteluun luotu laskentapohja pohjautuu kuvan 26 mukaiseen algoritmiin. Kokonaisuus on laaja ja se koostuu useasta eri osiosta. Algoritmia luodessa otettiin huomioon kohdassa 4.5 esitetyn tutkimuksen tulokset mahdollisimman selkeän ohjelmakoodin muodostamiseksi. Puretaan seuraavaksi algoritmi eri osiin ja esitellään algoritmit ja niiden toiminnot. Tarkoitus ei ole kuvata kaikkia vaiheita yksityiskohtaisesti vaan esitellä algoritmin perusperiaatteet. Algoritmi on jaettu yhdeksään eri osaan:

1. Geometrian kokoaminen
2. Tasojen ja seinien aukotus
3. Tasojen ja seinien verkotus
4. Rakenneosien luominen
5. Tukien ja vapautusten määrittely
6. Kuormitusten mallintaminen
7. Laskentamallin luominen
8. Rakenneosien mitoitus
9. Iterointi

5.3.1 Geometrian kokoaminen

Parametrisen mallin luominen alkaa geometrian kokoamisella ja muuttamisella Grasshopperin ympäristöön sopivaksi. Osassa 1 kerätään dwg-tiedostoon piirrettyjen pisteiden ja viivojen koordinaatit ja muokataan ne Grasshopperin ymmärtämään muotoon. Pisteiden ja viivojen koordinaatteja monistetaan lähtötietojen perusteella muihin vastaaviin kerroksiin kuvan 27 mukaisesti.

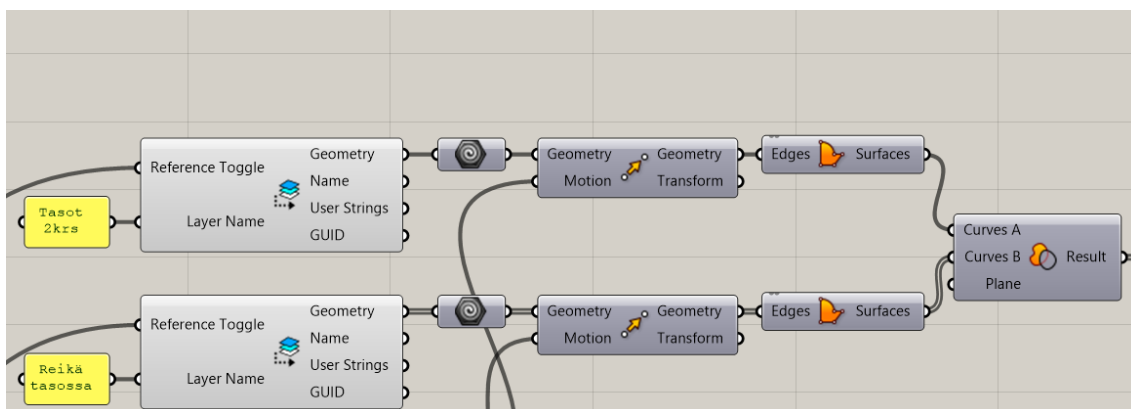


Kuva 27. Geometriatietojen muuttaminen Grasshopperin ymmärtämään muotoon.

Lähtötiedoissa voidaan määrittää parametrisen mallin muodostamiseen käytettävät dwg-tiedostot. Lisäksi voidaan määrittää, montako kerrosta kullakin tiedostolla halutaan muodostaa. Grasshopperiin määritetyt algoritmit suorittavat kerrosten monistamisen annetuilla parametreilla.

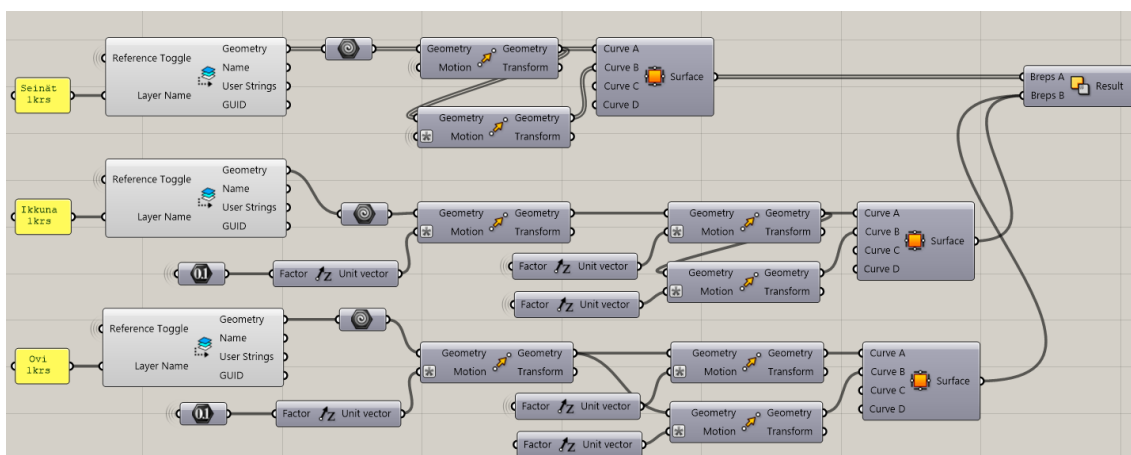
5.3.2 Tasojen ja seinien aukotus

Tasojen geometriat sekä tasoja leikkaavat reiät muodostetaan dwg-tiedostoon piirretyistä ulkogeometrioista tasoksi ”pursottamalla”. Reiitys tapahtuu ”Region Difference” -komponentin avulla. Tasojen ja reikien piirtämisessä tulee muistaa muodostaa suljettuja monikulmioita, jotta Grasshopper osaa muodostaa tasogeometriat oikealla tavalla. Kuvassa 28 on esitetty tasojen aukotukseen käytettävät ohjelmakomponentit.



Kuva 28. Tasojen aukotus.

Ikkunoiden ja ovien aukotus tapahtuu dwg-tiedostossa määritetyn leveyden sekä korkeusasemien perusteella. Kuvan 29 algoritmi suorittaa määritettyjen ehtojen perusteella ikkunoiden tasot malliin ja tämän jälkeen kyseisillä tasoilla leikataan seinien geometrioita.

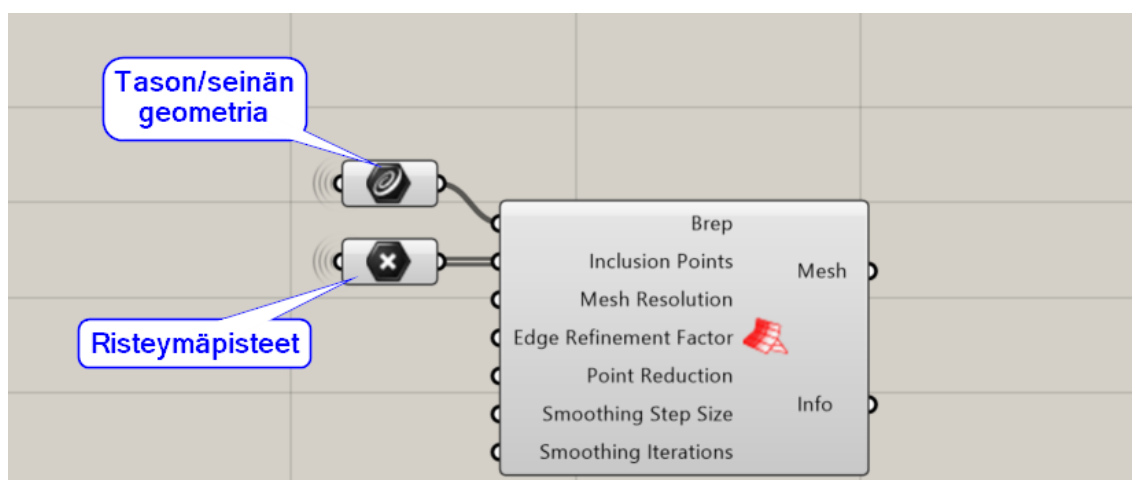


Kuva 29. Ikkunoiden ja ovien aukotus.

5.3.3 Tasojen ja seinien verkotus

Algoritmin osassa 3 verkotetaan seinät ja tasot. Verkotukseen käytettävä komponentti tarvitsee toimiakseen tason geometrian. Tasojen geometriat syötetään kuvan 30 verkotuskomponenttiin. Geometrian lisäksi komponenttiin syötetään tason elementtiverkkoon liitettävät rakenneosat, jotka ovat tässä tapauksessa seinät ja pilarit. Seinien ja pilareiden elementtiverkkojen solmupisteet liitetään tasojen verkotuskomponentteihin. Elementtiverkon tiheys on parametrisoitu ja sen arvoa voidaan säätää seinille ja tasojen erikseen lähtötiedoissa. Verkon tiheys on oletuksena molemmille rakenteille 0,5 m. Tasoja käsitellään tässä työssä pelkästään kuormia jakavina rakenteina,

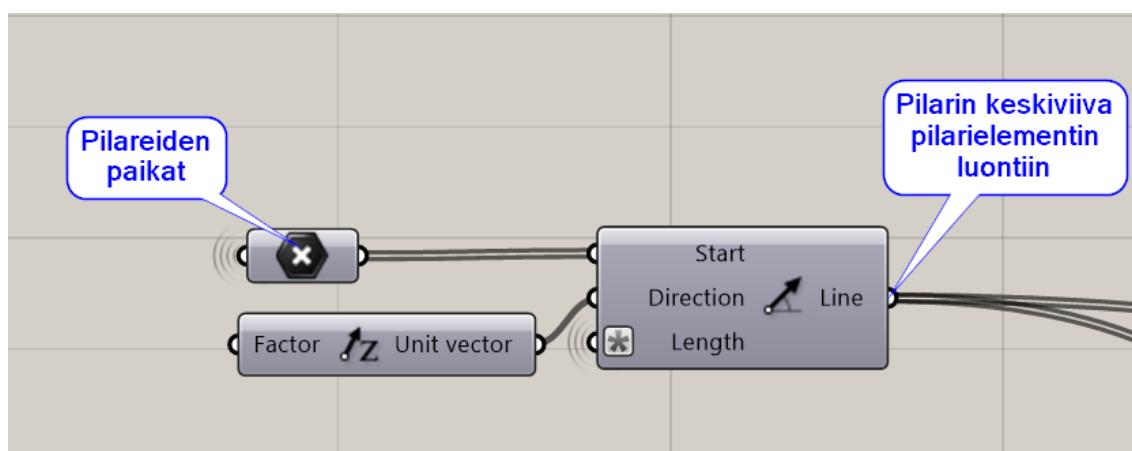
joten niiden kohdalla elementtiverkon tiheys voi olla harvempi kuin muualla rakenteissa. Elementtiverkon harvennus nopeuttaa laskenta-aikaa huomattavasti varsinkin suuremmilla malleilla.



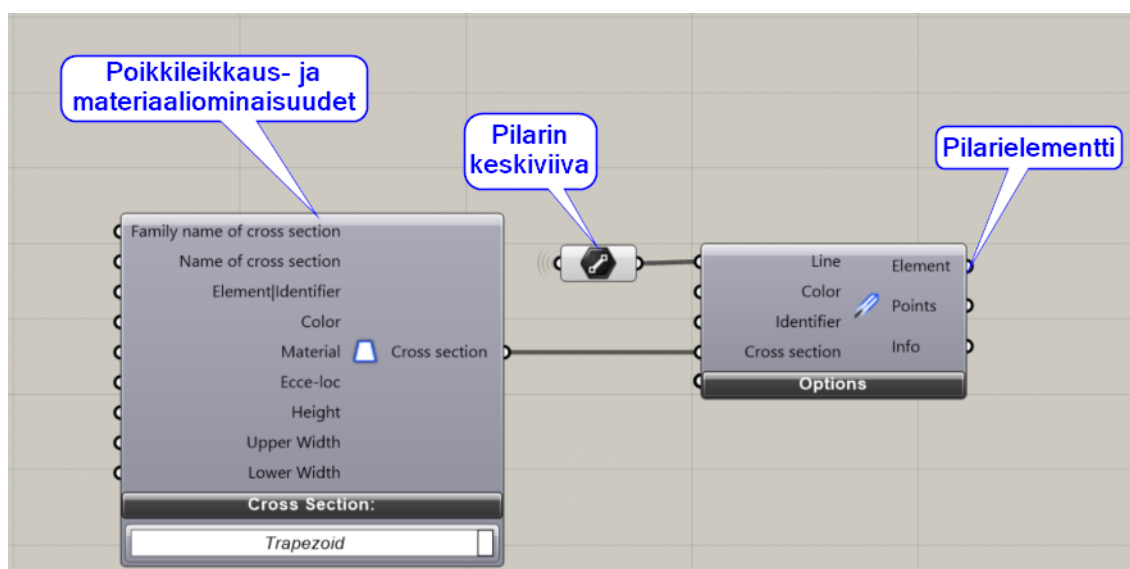
Kuva 30. Seinien ja tasojen verkotus.

5.3.4 Rakenneosien luominen

Pilarin ja palkin geometrian peruste on rakenteen keskijana, joka määrää rakenneosan pituuden. Palkin pituus määritetään dwg-tiedostoon piirtämällä ja pilarin pituus muodostuu kerroskorkeuden mukaan. Keskijanan lisäksi rakenneosalle on määriteltävä poikkileikkaus ja materiaali. Pilareiden keskiviivat määritellään pisteistä lähtevien normaalivektoreiden perusteella kuvan 31 mukaisesti. Rakenneosien keskiviivat syötetään kuvan 32 ohjelmakomponentteihin, jotka muodostavat lähtötietojen perusteella elementtiverkot rakenneosille.



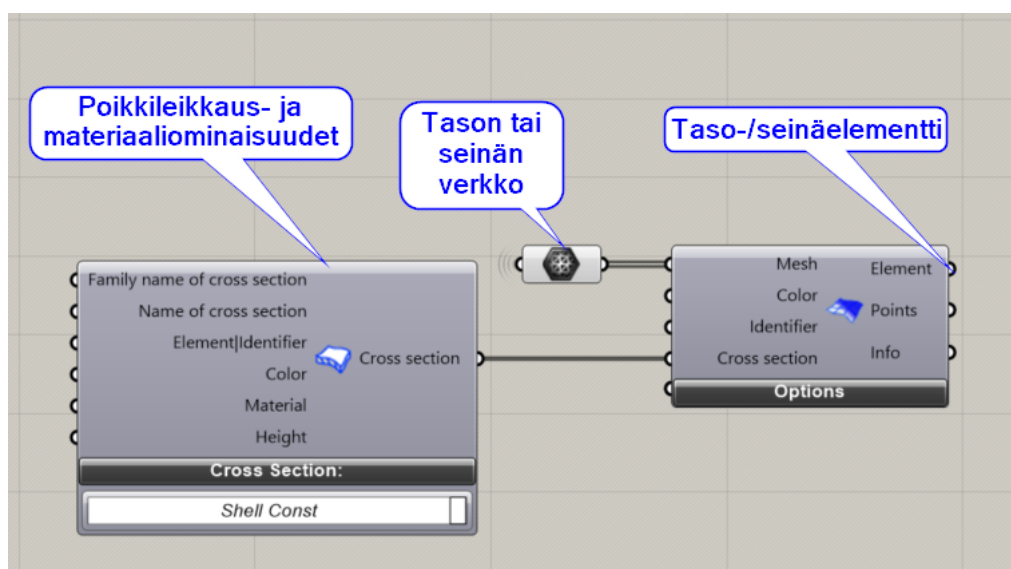
Kuva 31. Pilareiden keskiviivat pisteiden mukaan.



Kuva 32. Pilarin/palkin luonti Grasshopperissa keskiviivan suhteen.

Rakenneosien poikkileikkaus- ja materiaaliominaisuudet ovat ohjelmassa oletusasetuksena teräsrakenteisia. Laskentapohjaan määritettiin oletusmateriaaliksi työssä tarkasteltu materiaali eli betoni. Pilarin poikkileikkauksen iteraation lähtöarvoksi syötettiin 480x480 mm ja palkin 380x480 mm. Algoritmi suorittaa rakenneosien mitoituksen iteroimalla kohdan 5.3.9 mukaisesti. Edellä mainitut poikkileikkaukset ovat vain ensimmäisen laskennan lähtöarvoja.

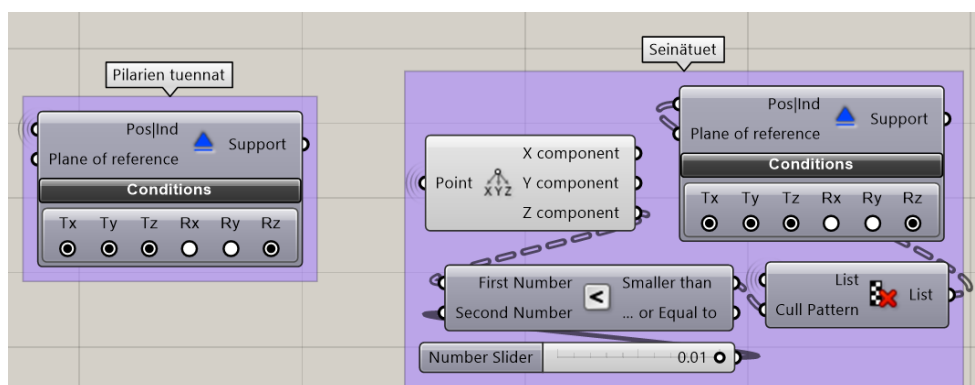
Tasojen ja seinien verkotus esitettiin kohdassa 5.3.3. Verkotuksen jälkeen geometria syötetään kuvan 33 mukaiseen komponenttiin. Seinien paksuuksille käytetään iteraation lähtöarvona 200 mm. Kuten kohdassa 2.5.2 mainittiin, välipohjarakenne huomioidaan pelkästään rakenteellisena massana sekä kuormaa jakavana rakenteena. Käytettävä välipohjarakenne ja välipohjarakenteen paksuus voidaan määrittää lähtötiedoissa.



Kuva 33. Tason/seinän luonti Grasshopperissa elementtiverkon suhteen.

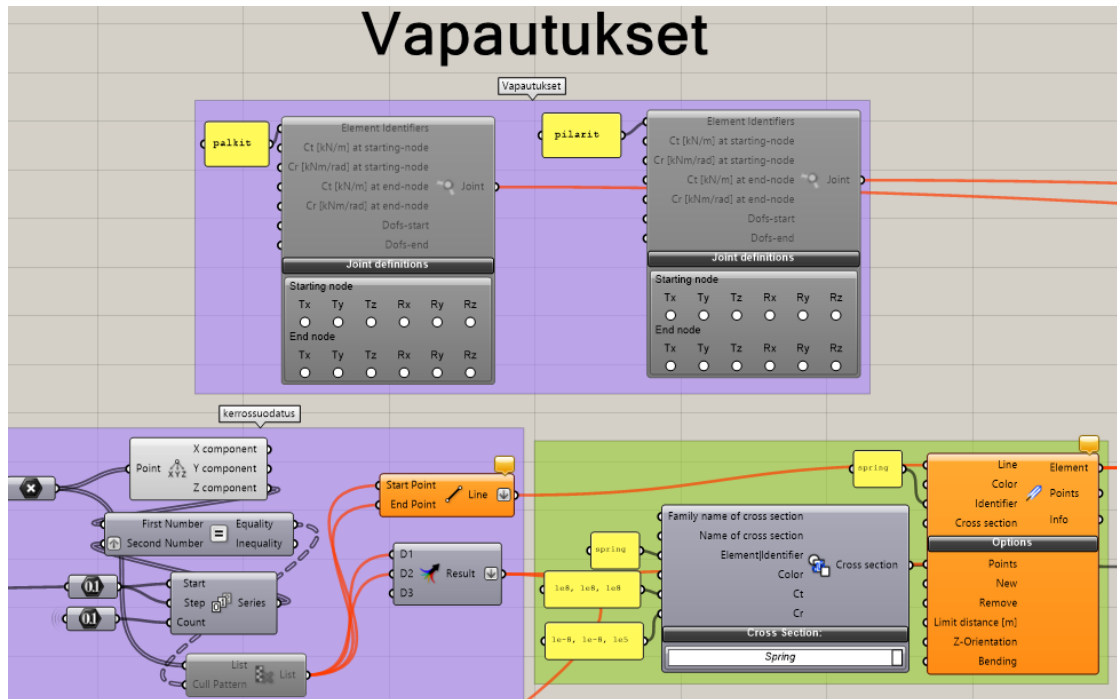
5.3.5 Tuentaetojen määrittely

Laskentamallin rakenteille on määriteltävä asianmukaiset tuennat, jotta ohjelma suorittaa laskennan. Pilareiden tuennat on mallinnettu oletusarvona kaikille alimman kerroksen pilareille, joille on annettu oletuksena vapautuksia kiertyminen suhteen x- ja y-akselien ympäri (kuva 34). Seinien viivamaisia tuentoja ei ole ohjelmassa suoraan mallinnettavissa vaan ne on mallinnettava etsimällä seinän elementtiverkkojen alimmat pisteet ja muodostettava tuennat näihin pisteisiin. Seinien tuennat on mallinnettu pilarien tavoin kaikille alimman kerroksen pilareille ja niille on annettu oletuksena samat vapautukset kuin pilareille. Pilareiden ja seinien välisiä tuentaetoja voidaan muuttaa lähtötiedoissa.



Kuva 34. Pilarien ja seinien tukien mallintaminen.

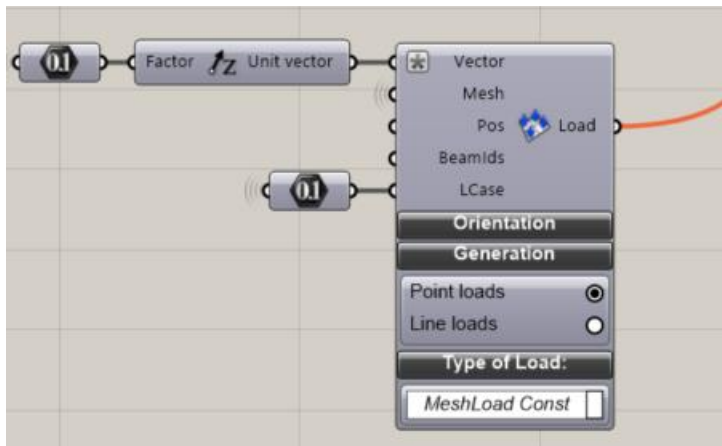
Karambassa ei pysty mallintamaan tasojen välisiä kinemaattisia rajoitusehtoja kuten vastaavissa FEM-laskentaohjelmissa. Solmupisteiden välille tulee mallintaa äärettömän lyhyet jouset, joiden jousivakio tulee asettaa niin heikoksi, että se toimii nivelenä kyseisessä suunnassa. Sauvamaisten rakenneosien välisten vapautusten mallintamiseksi löytyy ohjelmasta valmiita komponentteja (kuva 35).



Kuva 35. Tasojen välisten kinemaattisten rajoitushtojen mallintaminen.

5.3.6 Kuormitusten mallintaminen

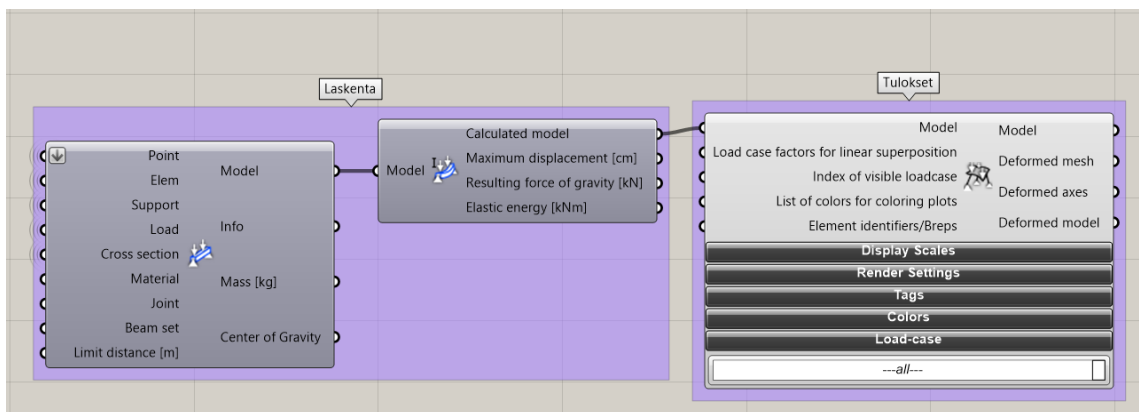
Kuormitusten mallintaminen suoritettiin Karamban ”Loads” -komponentin avulla (kuva 36). Vaakatasojen kuormitukset mallinnetaan syöttämällä komponenttiin tasojen verkot sekä voiman suuntavektori, joka on tässä tapauksessa negatiivisen z-akselin suuntaan. Kuormituksen suuruus ja osavarmuuskertoimet syötetään suuntavektorin mukana ja ne saa arvonsa lähtötiedoista. Komponenttiin voidaan lisäksi määrittää kuormitusyhdistelmä, jossa mallinnettu voima vaikuttaa. Kuormitusyhdistelmän valinta tapahtuu lähtötiedoissa, jonka jälkeen kyseisen kuormitusyhdistelmän voimat mallintuvat laskentamalliin.



Kuva 36. Kuormitusten mallintaminen vaakatasoille.

5.3.7 Laskentamallin luominen

Osassa 7 kootaan malli edellä esitettyjen algoritmien tulosten perusteella. Mallin koontiin ja laskentaan käytetään kuvassa 37 esitettyjä komponentteja ”Assemble model” ja ”Analyze”. Komponentit muodostavat FEM-laskentamallin pisteiden, rakenneosien, tuentojen, kuormitusten, poikkileikkausten ja vapautusten perusteella. ”Analyze” komponentin käyttämä laskenta perustuu kohdassa 3.4 esitettyyn ensimmäisen kertaluvun lineaariseen analyysiin.

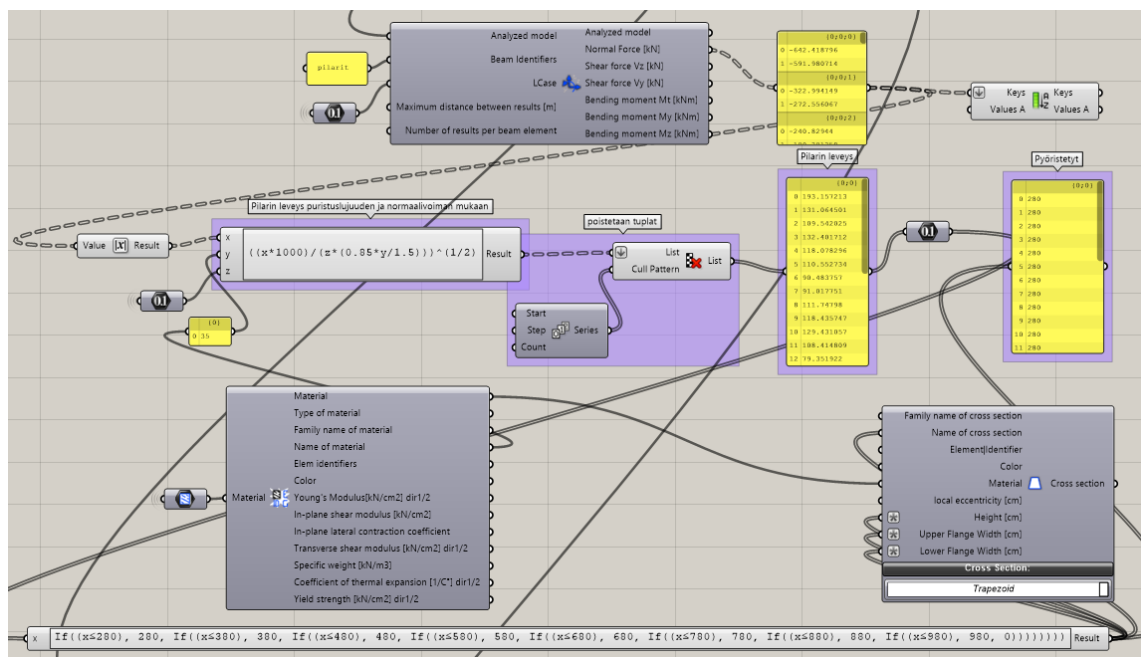


Kuva 37. Laskentamallin luontiin ja tulosten tarkasteluun käytetyt komponentit.

Mallin muodostamisen ja laskennan jälkeen voidaan tarkastella laskennan tuloksia. Tulosten tarkastelu tapahtuu liittämällä muodostettu laskentamalli ”Model View” –komponenttiin. Lisäksi voidaan tarkastella yksittäisten rakenneosien tuloksia erilaisten komponenttien avulla.

5.3.8 Rakenneosien mitoitus

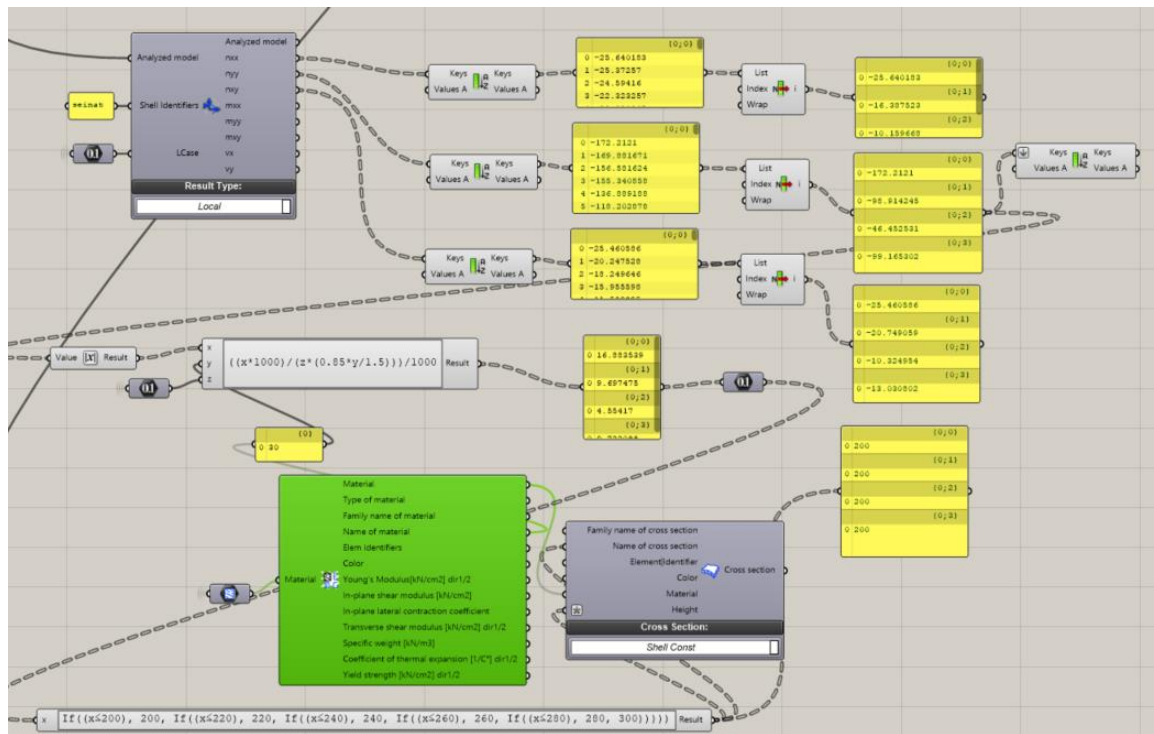
Pystyrakenteiden osalta yksittäisissä rakenneosissa vaikuttavien voimien tuloksia on sovellettu kohdassa 2.5.1 esitettyyn menetelmään, jossa rakenneosat mitoitetaan normaalivoimalle puristuslujuuden mukaan. Menetelmä on karkea eikä huomioi mitoituksessa yhtä yleisintä hoikkien pystyrakenteiden stabiilisuuden menetystapaa, joka on nurjahdus. Tämän vuoksi pystyrakenteiden mitoituksessa on puristuslujuuden mitoitusarvoon sisällytetty varmuuskerroin lähtötiedoissa. Seinien mitoituksessa käytetään suurempaa varmuutta, sillä rakenne on hoikempi verrattuna pilariin. Kuvassa 38 on eritelty parametrin mallin laskentatulokset rakenteissa vaikuttavien normaalivoimien osalta ja syötetty ne kaavaan 2. Laskennan tuloksena saadaan rakenteiden vaadittavat poikkipinta-alat, jotka on pyöristetty kohdan 2.5.1 mukaisesti. Mitoitusalgorithmi suorittaa laskennan jokaiselle rakenneosalle erikseen ja syöttää poikkileikkaustiedot kuvan 38 komponentille.



Kuva 38. Pilareiden mitoitusalgorithmi.

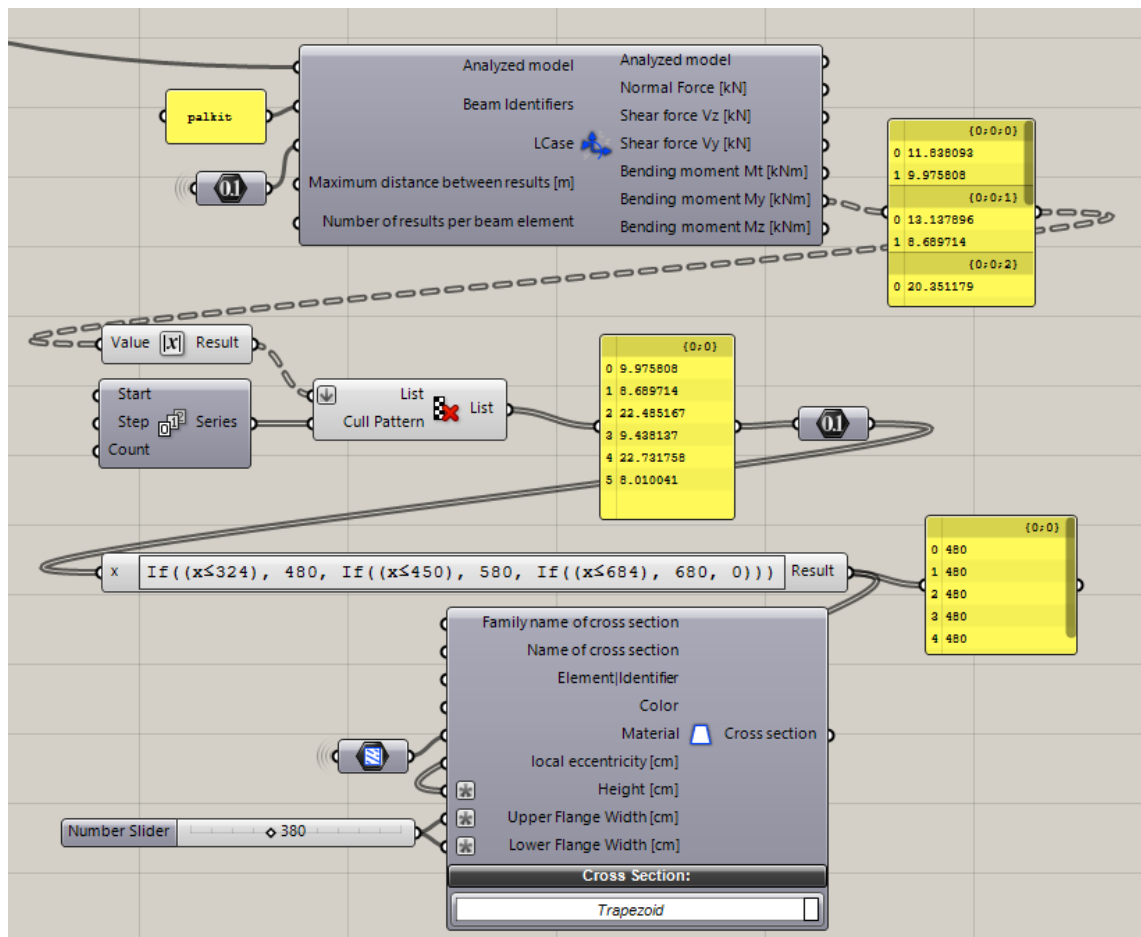
Vaikkakin pilareiden koot on rajattu pelkästään laskettaviksi neliöinä ei se tarkoita sitä, etteikö kohteessa voitaisi käyttää muita suorakaiteen muotoisia profiileja. Pilarin vaadittava poikkileikkaus on helpointa ja informatiivisinta ilmoittaa neliönä, jonka perusteella voi helposti määrittää myös pyöreän tai muun suorakaiteen muotoisen pilarin vaadittavan poikkileikkauksen mitat. Yksinkertaistus sovittiin työn alkuvaiheessa.

Seinien mitoituksessa käytetään vastaavaa menetelmää kuin pilareidenkin mitoituksessa. Seinän mitoitus perustuu yksittäisessä seinässä vaikuttavaan maksiminormaalivoimaan. Komponentti antaa ulos listan voimia, joista on suodatettu jokaiselle rakenneosalle maksimiarvot, joiden perusteella suoritetaan mitoitus. Laskentatulokset pyöristetään kohdan 2.5.2 mukaisesti. Laskennasta saadaan lisäksi ulos myös muita voimasuureita (kuva 39), joita voidaan jatkossa käyttää esimerkiksi seinien mitoitusmenetelmien laajentamisessa.



Kuva 39. Seinien mitoitusalgoritmit.

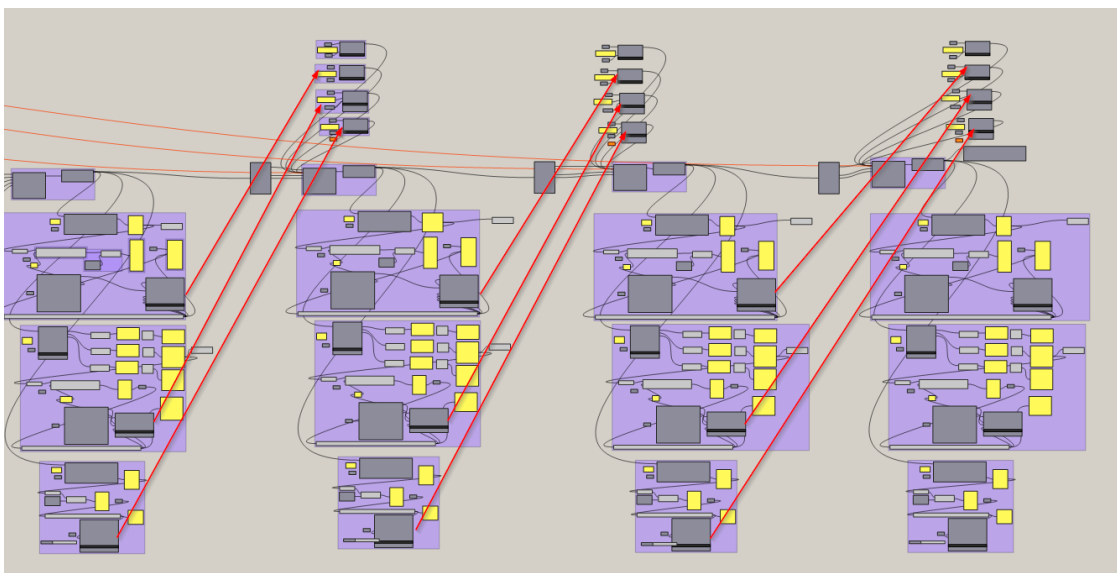
Palkkien mitoitus perustuu kohdassa 2.5.2 esitettyyn menetelmään, jossa mitoitetaan rakenneosa poikkileikkauksessa vaikuttavan maksimimomentin mukaan. Kuvan 40 mukaiseen algoritmiin on syötetty reunaehdoiksi kantokykykäyrästäjien mukaiset maksimimomenttien arvot jokaiselle poikkileikkaukselle. Algoritmi vertaa jokaisen poikkileikkauksen maksimimomenttia reunaehtoihin ja syöttää saadut poikkileikkausten tulokset kuvan 32 komponentille.



Kuva 40. Palkkien mitoitus kohdan 2.5.2 mukaan.

5.3.9 Iterointi

Osassa 9 optimoidaan rakennetta iteroimalla rakenneosien paksuuksia. Alustavan laskentamallin luomisen jälkeen laskentapohja suorittaa rakenteiden optimoimisen. Optimoinnilla tarkoitetaan iteraatiokierroksia, joiden avulla selvitetään optimaaliset rakenteiden nimellismitat. Rakenteiden nimellismitat vaikuttavat omaan painoon ja kuormien jakautumiseen, joten on löydettävä sopiva suhde näiden väliltä. Optimoinnin toteutus tapahtuu automaattisesti parametrisen mallin purkamisella ja uudelleen luomisella edellisen mallin lopputulosten perusteella. Kuvassa 41 näkyy, kuinka edellisen laskennan tuloksia käytetään lähtötietoina seuraavan laskennan suorittamiselle.



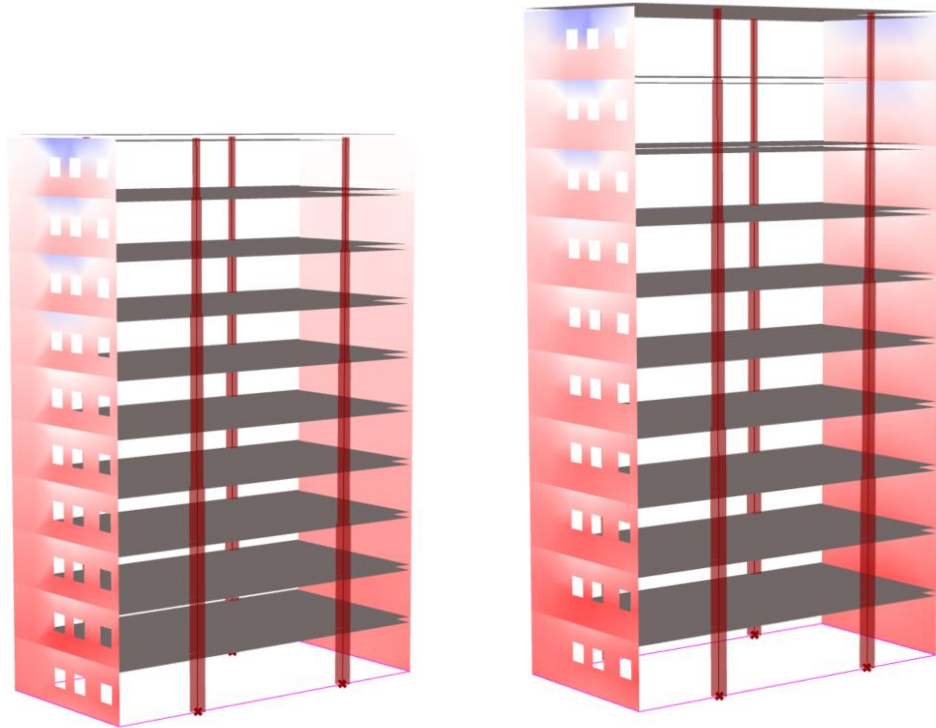
Kuva 41. Mallin purkaminen ja iterointi.

Malli kootaan uusiksi kohdan 5.3.7 mukaisesti. Laskentatulokset muuttuvat ensimmäisen iteraatiokierroksen jälkeen eniten, sillä rakenneosien lähtöpoikkileikkaukset harvoin pitävät paikkaansa, ne ovat vain iteraation lähtöarvoja. Ensimmäisen ja toisen iteraatiokierroksen välisissä tuloksissa voi olla vielä pieniä eroavaisuuksia, mutta toisen ja kolmannen iteraatiokierroksen jälkeen tulokset näyttävät rakenneosien poikkileikkausten suhteen samalta. Voimasuureissa voi olla vielä pieniä heittoja, mutta voimakkaan pyöristämisen vuoksi rakenneosien poikkileikkausten määrittelemiseksi ei tarvita kuin muutama iteraatiokierros. Iterointi on toteutettu työssä ohjelmakomponenttien avulla. Iterointi voidaan toteuttaa myös skriptaamalla, jolloin voidaan määrittää huomattavasti useampi iteraatiokierros laskennalle.

5.4 Parametrinen malli

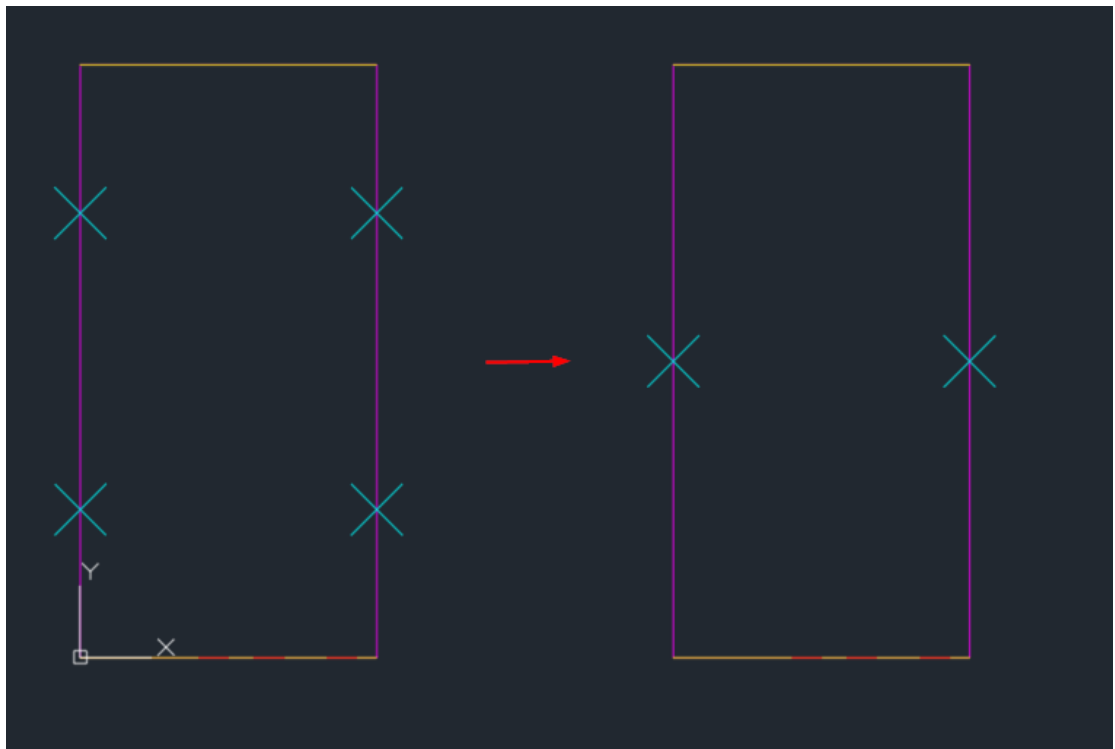
Kuvassa 43 on edellä esitetyllä algoritmilla luotu parametrinen malli, joka muodostuu Grasshopperiin määritettyjen algoritmien sekä lähtöparametrien avulla. Kuvan 42 parametrisen mallin rakenne on kuvitteellinen ja muodostettu tässä tapauksessa pelkästään periaatteen havainnollistamiseksi. Muutosten tekeminen lähtötietoihin muuttaa mallia reaaliajassa. Tehdään demonstraation vuoksi muutos esimerkiksi kerroskorkeuteen. Rakennus on uudelleen mitoitettu muutetulla lähtöarvolla ja parametrinen malli on luotu dynaamisesti. Kerroskorkeuden muuttaminen vaatisi huomattavasti suuremman työn laskentamallin muokkaamiseksi muissa FEM-

laskentaohjelmissa, sillä jokainen pystyrakenne tulisi muokata kerroskorkeuden muutoksen verran.

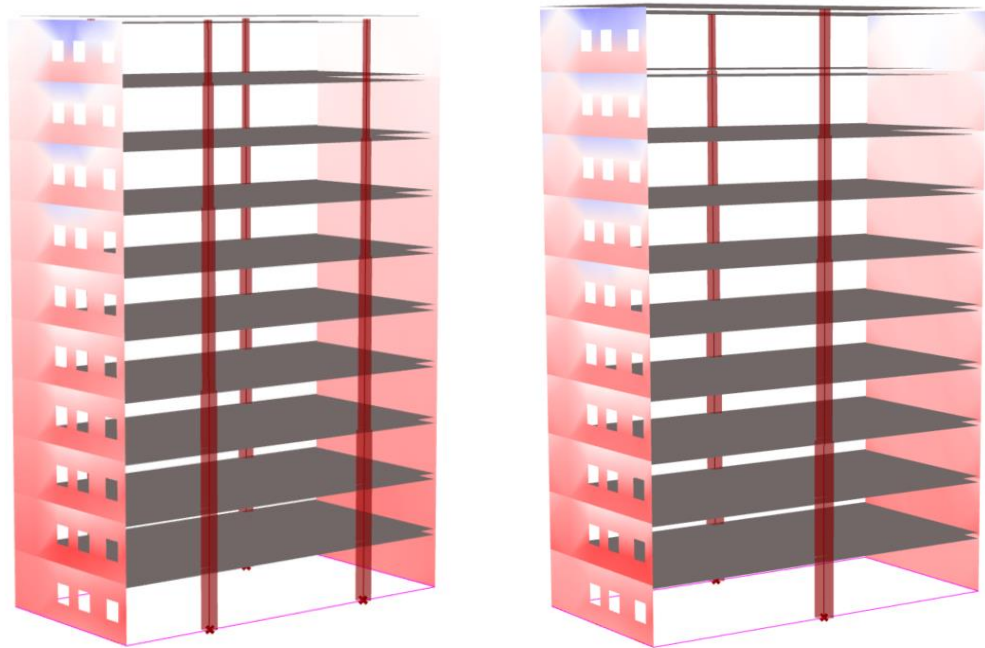


Kuva 42. Parametrinen malli kerroskorkeudella 3000 mm ja 3500 mm.

Suoritetaan seuraavaksi esimerkin vuoksi yksinkertainen rakenteellinen muutos malliin ja siirretään pilareiden paikkaa. Rakennuksen kantavat rakenteet määritetään dwg-tiedostoon kohdan 5.1 mukaisesti. Rakenteellinen muutos tapahtuu muokkaamalla dwg-tiedostossa pilareiden paikkoja (Kuva 43). Tuodaan seuraavaksi muokattu tiedosto Rhinoon ja suoritetaan laskenta. Laskennan tuloksena saadaan parametrinen malli (kuva 44).



Kuva 43. Pilareiden siirtäminen.



Kuva 44. Parametrinen malli neljällä pilarilla ja pilareiden siirtämisten jälkeen.

5.5 Yksinkertaistukset

Edellä esitetty algoritmi sisältää tiettyjä yksinkertaistuksia parametrisen mallin luontiin, jotka sovittiin työn alkuvaiheessa ja työn edetessä. Yksinkertaistukset tehtiin ajatellen luonnossuunnitteluvaiheen kokonaisuutta. Haarukoitaessa hankeen alustavia rakenteiden mittoja sekä kuormituksia ei ole kannattavaa luoda liian spesifiä laskentamallia alkuvaiheessa. Parametrisen mallin yksinkertaistaminen nopeuttaa laskenta-aikaa ja vaihtoehtojen vertailua. Yksinkertaistuksia ovat:

- rakenteet mallinnetaan kaikki keskipisteiden ja keskiviivojen perusteella
- sekundäärirakenteita ei mallinneta
- rakenneosien mitoitus ei huomio jatkuvaa sortumaa CC3b luokan rakenteilla
- pilareiden koot ilmoitetaan pelkästään neliöinä
- välipohjarakennetta ei mitoiteta vaan laatasto toimii pelkästään kuormaa aiheuttavana ja jakavana rakenteena
- välipohjan paksuus on joka paikassa sama
- yksittäisten rakenneosien materiaaliominaisuuksia ei voida muuttaa vaan ne on määritelty kaikille pilareille, seinille ja palkeille lähtötiedoissa
- hyötykuorman arvo on joka kerroksessa sama
- tuulikuormituksen arvo huomioidaan kokonaisresultanttina jakamalla kuormitus kerroksittain välipohjaan viivakuormaksi.
- toisen kertaluvun vaikutuksia ei huomioida
- perustuksia ei mitoiteta
- palomitoitusta ei huomioida.

6 TUTKIMUSOSIO

Diplomityön tarkoituksena on tutkia parametrisen suunnittelun soveltuvuutta betonirakenteisen rungon luonnossuunnitteluun. Tässä osiossa sovelletaan edellisessä kappaleessa esiteltyä laskentapohjaa käynnissä olevan luonnossuunnitteluhankkeen käyttötarpeisiin. Laskentapohjalla mitoitetaan alustavia rakenteiden poikkipinta-aloja ja perustuskuormia murtorajatilassa sekä tutkitaan rakenteen kokonaisstabiiliteettia ja siirtymiä. Kappaleessa 7 esitetään parametrisellä suunnittelulla saadut tulokset ja verrataan niitä perinteisillä laskentamenetelmillä saatuihin tuloksiin.

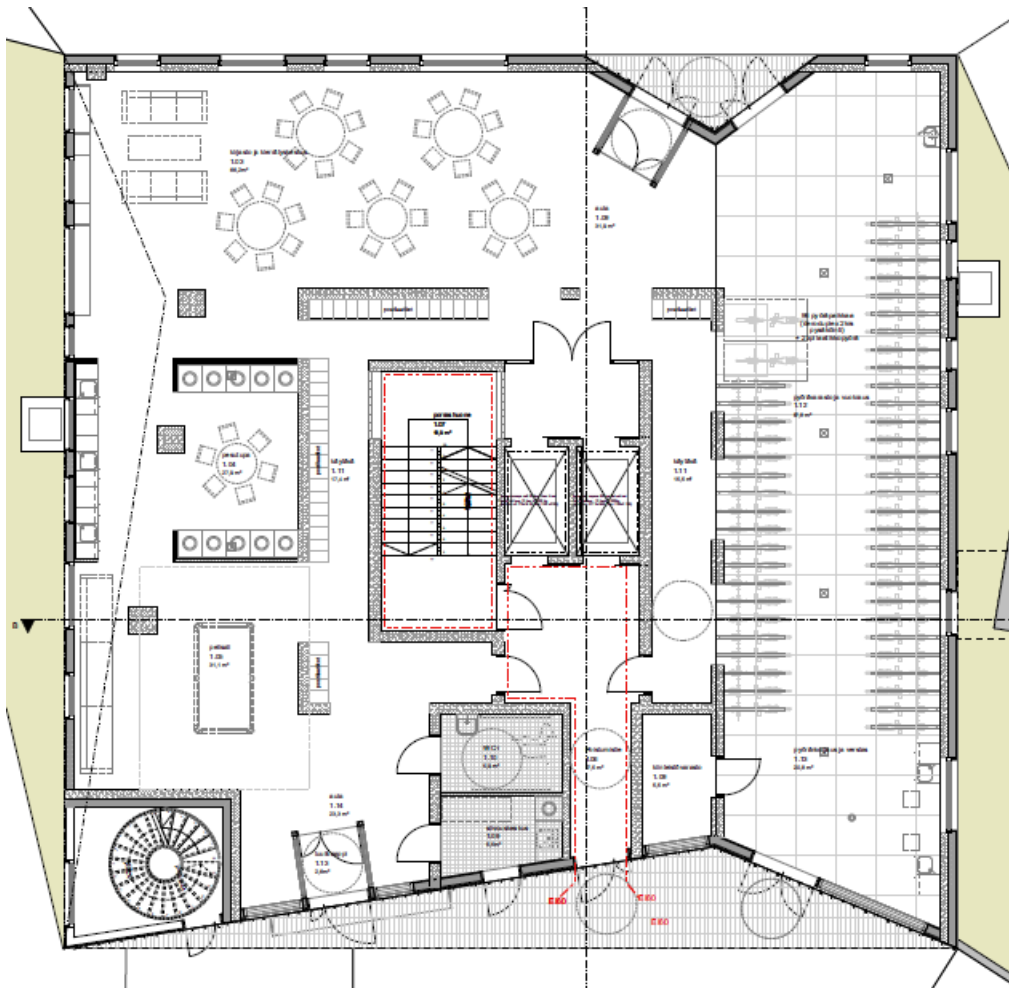
6.1 Tutkimuskohteen esittely

Tutkimuksen kohteena toimii alt Arkkitehtien suunnittelema 20-kerroksinen noin 60 metriä korkea tornitalo. Rakennuksen maksimimitat ovat noin 22x22 m. Kerroskorkeus on ensimmäisessä kerroksessa 4,5 metriä ja muissa kerroksissa 3 metriä. Rakennuksen ulkomuoto on esitetty kuvassa 45 sekä kerrosten pohjapiirustukset kuvissa 46, 47 ja 48. Rakennuksessa on lisäksi yksi maanalainen kerros.



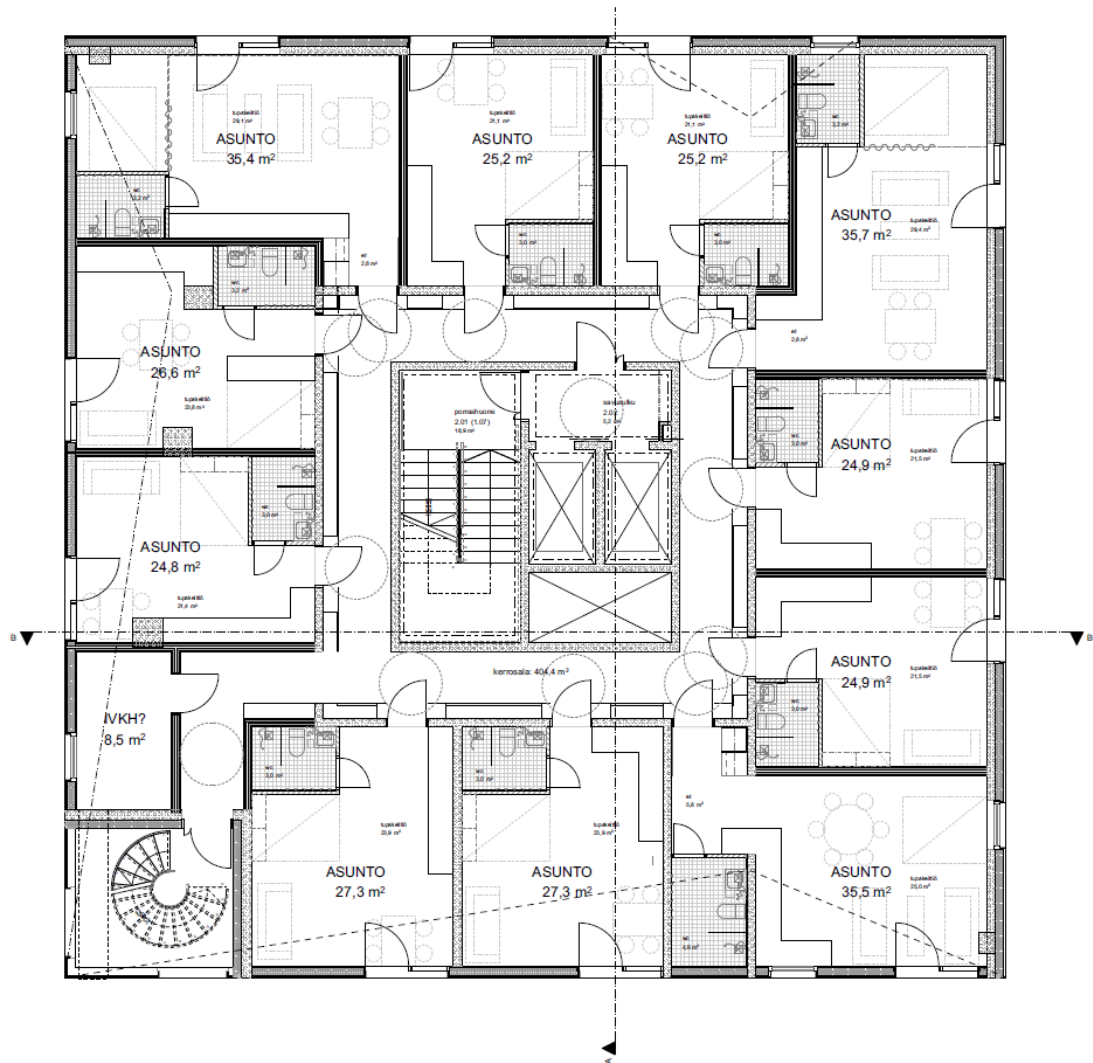
Kuva 45. Tutkimuskohteen alustava alt Arkkitehtien luoma IFC-malli.

Rakennusrunko on yhtenäinen eikä siinä ole liikuntasauvoja. Sisäänkäyntikerros on 4500 mm korkea yhteiskäyttöön suunniteltu yleistila. Yleistilan avaruus on oleellinen tekijä tilasuunnittelun kannalta. Suunnittelussa on otettava alusta asti huomioon rakennuksen kantavat linjat, joiden on ulotuttava vesikatolta perustuksiin saakka. Sisäänkäyntikerroksen kantavina rakenteina toimivat pohjois- ja itäjulkisivun kantavat ulkoseinät sekä länsipään pilarit ja rakennuksen eteläpäässä kolme pystysuoraa seinää. Lisäksi kantavana ja jäykistävänä rakenteena toimii rakennuksen keskellä oleva hissi- ja porraskuilu sekä käytävien seinien muodostama kotelomainen rakenne (kuva 51).



Kuva 46. Tutkimuskohteen alustava alt Arkkitehtien luoma ensimmäisen kerroksen pohjapiirustus.

Tutkimuskohteen muut kerrokset sisäänkäynti pois lukien, ovat alustavasti 3000 mm korkeita. Kantavat rakenteet sovitetaan sisäänkäyntikerroksen kanssa samaan linjaan. Asuntoihin haluttiin hankkeen alusta lähtien muutosjoustavuutta, joten väliseinät suunniteltiin alusta alkaen pääsääntöisesti ei-kantaviksi.

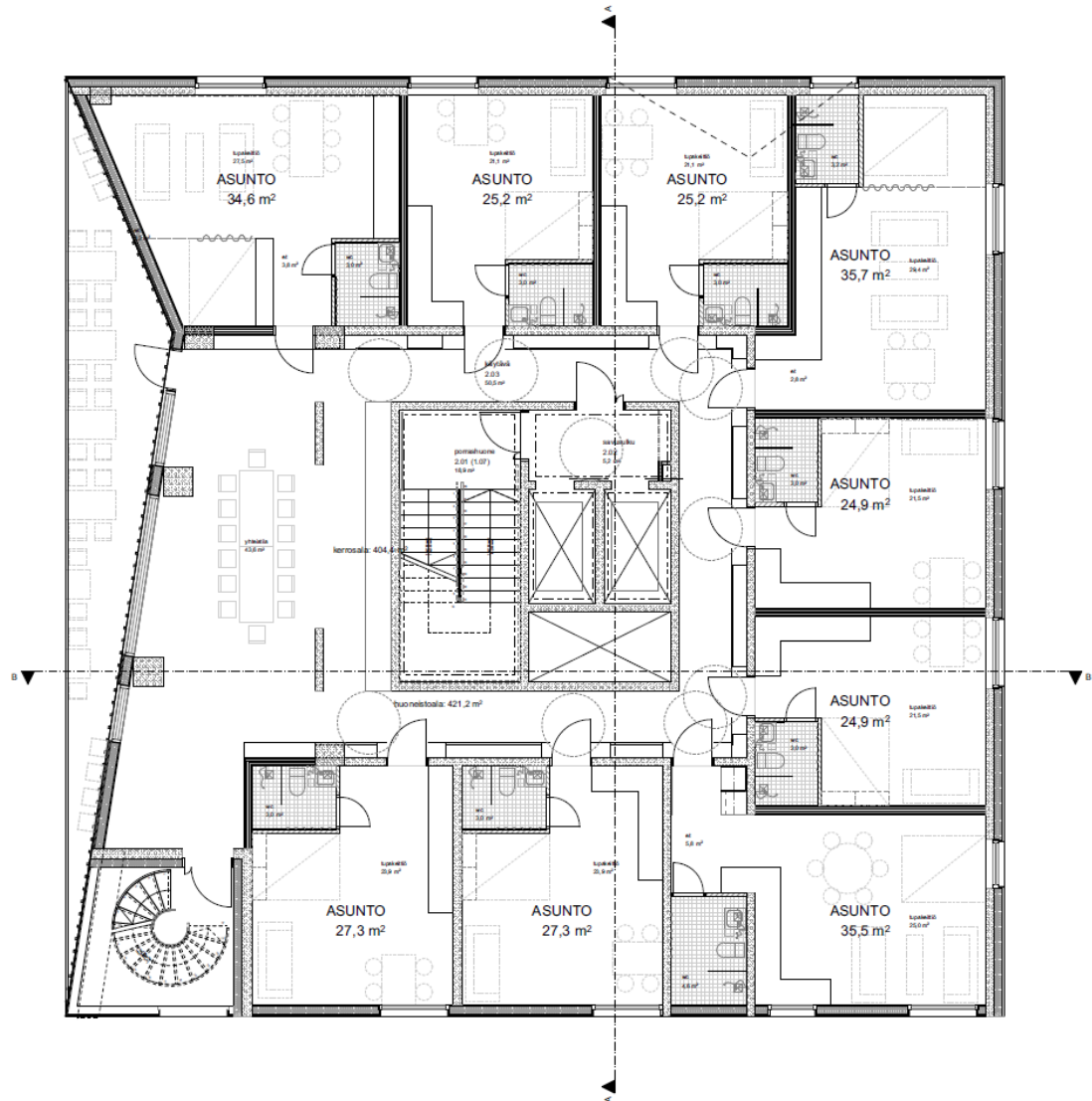


Kuva 47. Tutkimuskohteen alustava alt Arkkitehtien luoma 2-7 parillisten kerrosten pohjapiirustus.

Rakennus lukeutuu seuraamusluokkaan CC3, jonka perustella määräytyy Eurokoodissa SFS-EN 1991 esitetyn taulukon mukaan kuormituksille kerroin $K_{FI} = 1,1$. Rakennus täyttää korkean rakentamisen edellytykset Oulussa ja se on yli 15 kerrosta korkea, joten se lukeutuu onnettomuustilanteessa vaativimpaan seurausluokkaan CC3b.

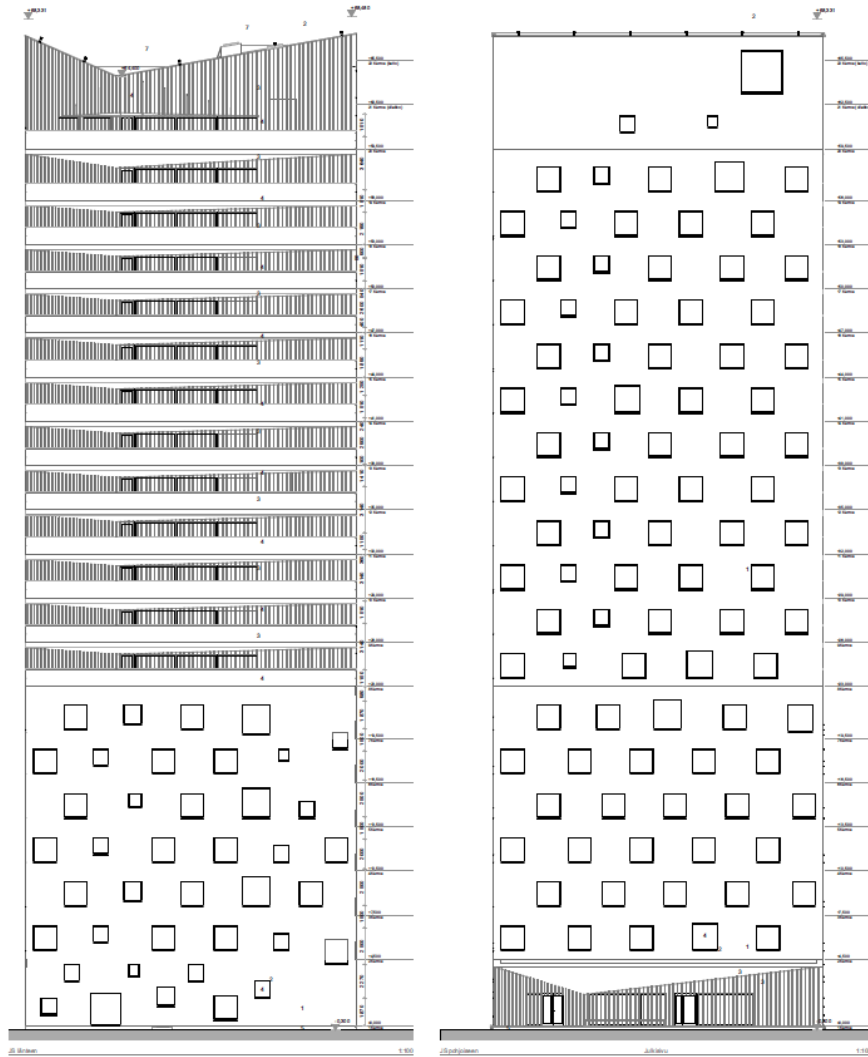
Seuraamusluokat asettavat kohteelle lukuisia vaatimuksia, jotka on otettava huomioon heti suunnittelun alkuvaiheessa. CC3b vaatii, että rakennuksen rakenteet tulee mitoittaa niin, että etenevä rakenteiden vaurioituminen tai jatkuva sortuma on estetty onnettomuustilanteessa. Rakenteille on muodostettava vaihtoehtoisia kuormansiirtoreittejä siirtämällä vauriosta johtuva kuormitus viereisille rakenteille. Jatkuvan sortuman mitoitusohjeet on esitetty Eurokoodissa SFS-EN 1991-1-7 ja Betonikortissa nro 23.

Rakennuksen länsisivulle tulee 8-19 kerroksiin ulokkeellisia parvekkeita, jotka tulee huomioida mahdollisimman varhaisessa vaiheessa suunnittelua. Ulokeparvekkeiden vuoksi länsipään kuormitukset tuodaan vesikatolta perustuksille pilareilla.



Kuva 48. Tutkimuskohteen alustava alt Arkkitehtien luoma 8-19 parittomien kerrosten pohjapiirustus.

Rakennuksen kantavat julkisivut ovat hyvin runsaasti rei'itettyjä. Ulkoseinien suunnittelussa on huomioitava alusta lähtien riittävien kantavien kaistojen määrä, jotta rakenne kantaa oman painonsa lisäksi myös laataston jakaman kuorman kerroksittain. Ulkoseinien rei'itys tulee ottaa myös huomioon koko rakennuksen jäykistysuunnittelussa.



Kuva 49. alt Arkkitehtien luomat länsi- ja pohjoissivun julkisivukuvat.

6.2 Runkojärjestelmän valinta

Rakennuskohteeseen haluttiin alusta lähtien muutosjoustavuutta tilaajan toimesta. Tämä tarkoittaa sitä, että huoneistojen välisiä kantavia rakenteita tulee välttää. Huoneistojen välisiä kantavia rakenteita ei voida jatkossa poistaa asuntojen pohjaratkaisujen muutosten yhteydessä. Mikäli kantavia rakenteita ei voida sijoittaa huoneistoihin, tulee ulkoseinien olla kantavia. Rakennerratkaisu on parempi jatkuvan sortuman kannalta, mutta huonompi ulkoseinän rei'ityksen kannalta.

Rakennuksen runkojärjestelmäksi valittiin Suomessa yleisesti korkearakentamisessa käytetyn ydinjärjestelmän ja kantavat seinät-laattajärjestelmän yhdistelmä, jossa ydinrakenne koostuu kahdesta rakennuksen keskellä olevasta kotelomaisesta rakenteesta

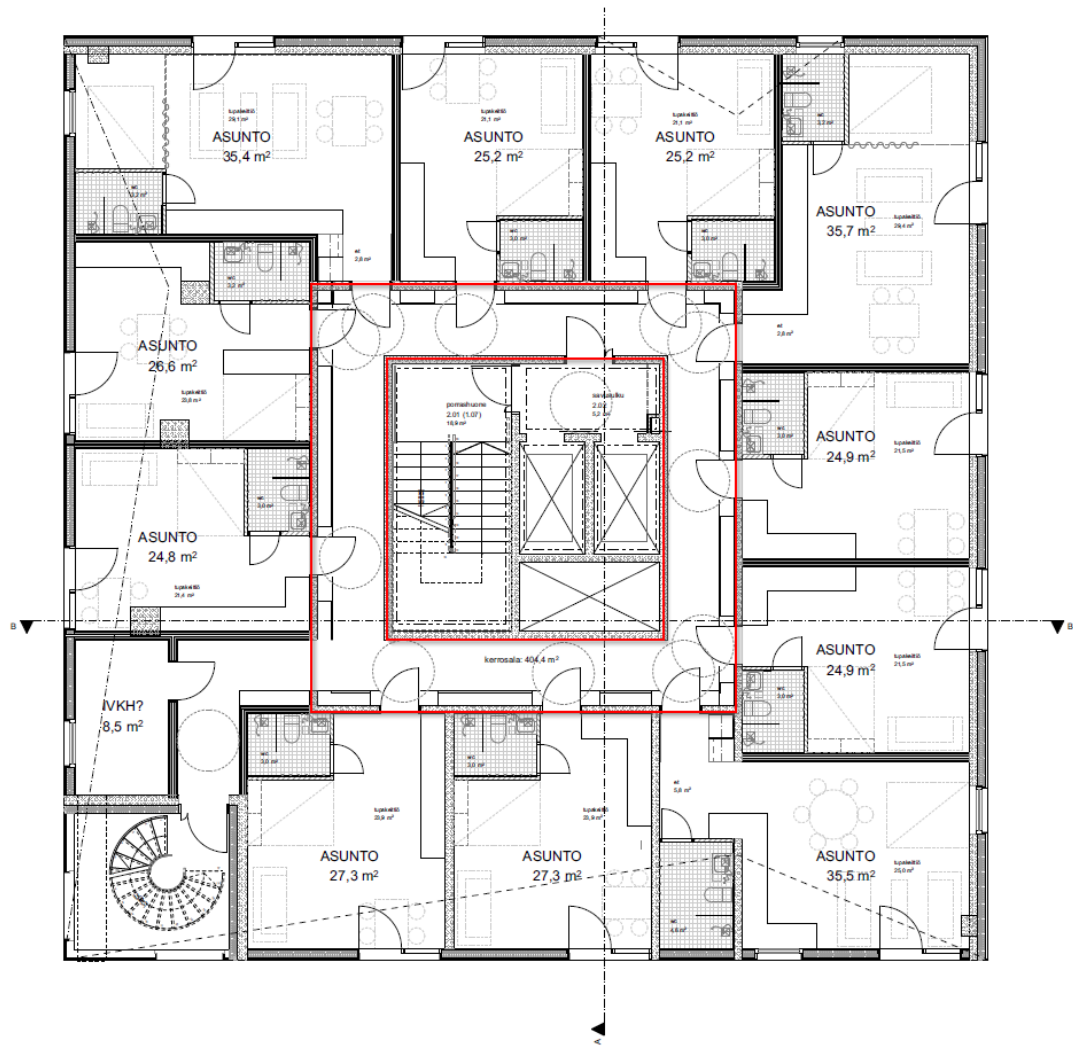
(kuva 50). Kantavina seininä toimivat rakennuksen pohjois- ja itäjulkisivujen ulkoseinät sekä eteläsivun väliseinät.

Rakennuksen runko toteutetaan tilaajan toiveesta pääosin paikalla valamalla. Paikalla valetulla rakenteella saavutetaan rakenteiden liitoksissa hyvät lujuusominaisuudet sekä varmistetaan jäykistävien osien jatkuvuus rakenteen läpi. Lisäksi käytettäessä paikalla valettuja välipohjia, saavutetaan hyvät ääneneristysominaisuudet kerrosten välillä välipohjalaatan tuoman massan vuoksi. Eteläsivun sisäänkäyntikerroksen sisäänvedon vuoksi eteläsivun ulkoseinää ei voida toteuttaa kantavana rakenteena vaan välipohjalaatasto tukeutuu kantaviin väliseiniin.

6.3 Jäykistysuunnittelu

Tutkimuskohteen runkojärjestelmäksi valittiin yhdistelmä rakenne ydinjärjestelmästä ja kantavat seinät-laattajärjestelmästä. Ydinjärjestelmän rakenteeksi valittiin alustavasti pelkästään rakennuksen keskellä sijaitseva porras- ja hissikuilujen ulkoseinistä muodostuva kotelomainen rakenne. Rakennuksen jäykkyyttä arvioitiin likimääräisin menetelmin luvussa 2.3 esitetyllä menetelmällä. Tuloksena saatiin, ettei kotelorakenne yksistään riitä rakennuksen stabiliteetin takaamiseksi, joten toiseksi jäykistäväksi kotelomaiseksi rakenteeksi valittiin myös asuntojen ja käytävien välisten seinien muodostama kotelomainen rakenne. Kuvaan 50 on merkitty sekä hissi- ja porraskuilun, että käytävien seinien muodostamat kotelomaiset rakenteet punaisilla neliöillä.

Tutkimuskohteessa päädyttiin kotelomaiseen mastojäykistykseen valitun runkojärjestelmän sekä hyvin runsaasti rei'itetyn julkisivun takia. Ulkoseinien voimakas rei'itys vaikuttaa osittain rakennuksen kokonaisjäykkyyteen, mutta niiden vaikutus kokonaisjäykkyyteen on silti hyvin merkittävä. Kuvaan 53 punaisella merkittyjen seinien rei'itysten suunnittelussa on huomioitava reikien vaikutus rungon jäykistävään kotelomaiseen rakenteeseen. Lisäksi on kiinnitettävä huomiota seinien liitosten mitoittamiseen, jotta kotelorakenne säilyttää laskennallisen jäykkyytensä luvun 2.3.2 mukaisesti. Jäykistysuunnittelussa tulee huomioida jäykistävän rakenteen riittävä pystykuormitus luvun 2.3 mukaisesti, jotta rakenteeseen ei kohdistuisi vetoa perustusten liitoksissa millään kuormitusyhdistelmällä.



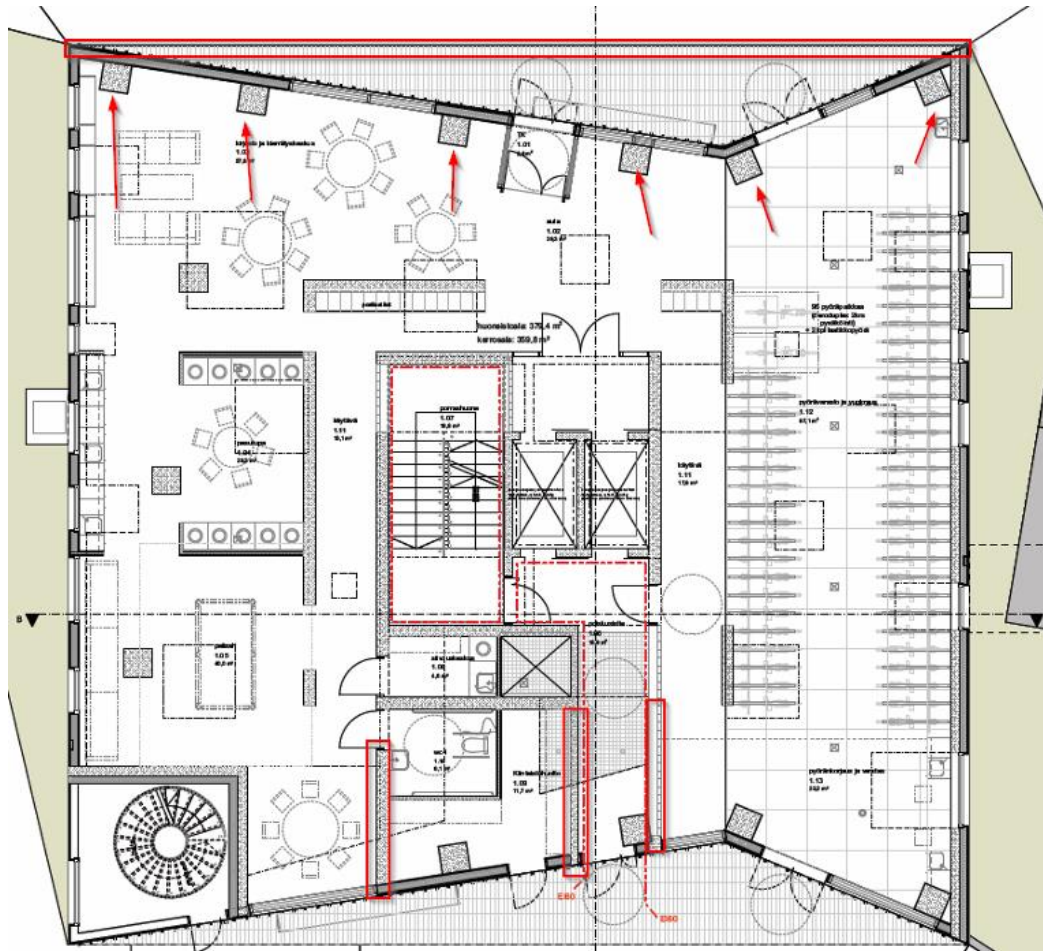
Kuva 50. Tutkimuskohteen kotelomainen jäykistysjärjestelmä.

6.4 Muutokset

Hankkeen aikana tapahtui lukuisia muutoksia muun muassa arkkitehdin tilasuunnittelun, rakennesuunnittelun, taloteknisen suunnittelun ja tilaajan toiveiden välisistä yhteensovittamisista. Hankeen aikana tehtiin seuraavia muutoksia:

- 8-19 kerrosten ulokeparvekkeiden sisäänvetoja pienennettiin parvekeliitoksen kantavuuden takia.
- Pohjoispäädyn sisäänveto poistettiin ja ulkoseinä muutettiin kantavaksi. Tämä johti myös pilareiden poistamiseen rakennuksen pohjoispäädyssä.
- Hissi- ja porraskuilun paikat muutettiin peilaamalla rakenteet hissi- ja porraskuilun välisen seinän suhteen.

- Julkisivun ikkunoiden asettelua muutettiin ulkoseinän kantavuuden parantamiseksi.
- Rakennuksen eteläpään ulokeparvekkeista luovuttiin hankkeen alkuvaiheessa.



Kuva 51. Hankkeen rakenteelliset muutokset ensimmäisessä kerroksessa.

6.5 Kuormitukset ja kuormitusyhdistelmät

Tutkimuskohteen rakenteiden omapainot määräytyvät rakenteiden dimensioiden mukaan. Hyötykuormat määräytyvät Eurokoodin SFS-EN 1991-1-1 mukaisesti. Lumikuormitus on laskettu Eurokoodin SFS-EN 1991-1-3 mukaisesti ja kinoslumikuormat on jätetty yksinkertaistuksen vuoksi määrittelemättä ja ne on sisällytetty lumikuorman arvoon. Rakennuksen alustavaan mitoittamiseen tarvittavat kuormitukset ja rakenneluokitukset ovat seuraavia:

- Betonin omapaino 25 [kN/m³]
- Välipohjien hyötykuorma 2.5 [kN/m²]

- Parvekkeiden hyötykuorma 2.5 [kN/m²]
- Parvekelasitus 2.0 [kN/m]
- Ei-kantava ulkoseinälinja 2.0 [kN/m]
- Lumikuorma 2.5 [kN/m²]
- Seuraamusluokka CC3
- Luotettavuusluokka RC3
- Kuormituskerroin $K_{FI} = 1,1$
- Tuulikuorman maastoluokka II.
- Rakennuksen käyttöikä 50 vuotta.

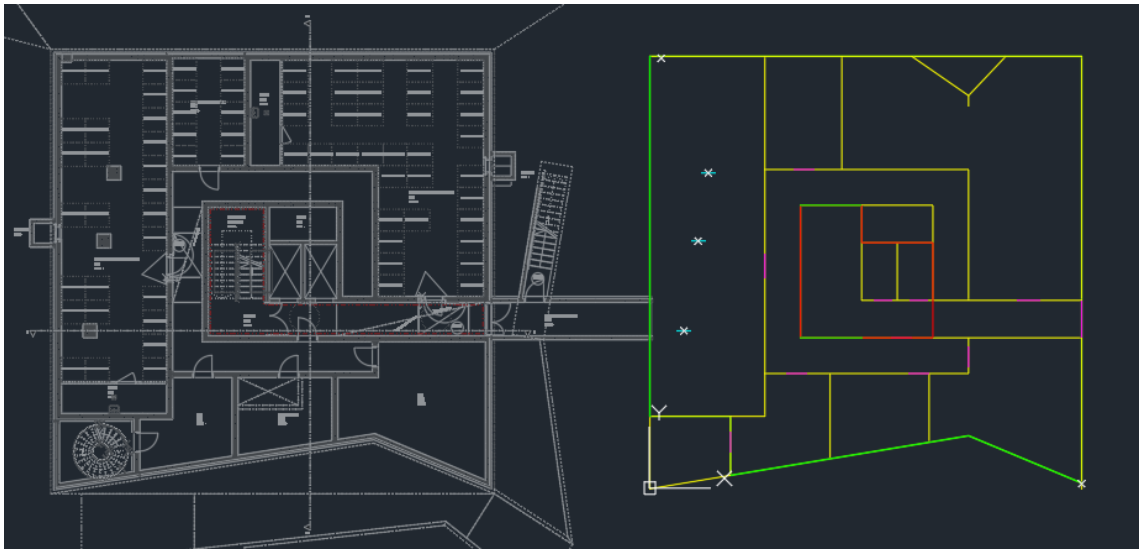
Rakennuskohteeseen suoritettiin tuulisuusselvitys Ilmatieteen laitoksen toimesta. Laskennassa käytettävät tuulikuormat laskettiin voimakertoimen avulla. Korkeassa rakennuksessa tulee suorittaa tuulikuorman määrittämiseksi korkeusasemasta riippuva tuulivoiman jakauma rakennuksen eri korkeuksissa. Käytetään tässä työssä yksinkertaistuksen vuoksi tuulikuorman arvona resultanttia, joka syntyy korkeusasemasta riippuvista arvoista. Tuulikuomien laskentamenetelmät on kuvattu Eurokoodissa SFS-EN 1991-1-4. Murtorajatilatarkastelut suoritetaan rakenneosien mitoituksessa STR-kuormitusyhdistelmillä. Kokonaisstabiliteettia tarkastellaan EQU-kuormitusyhdistelmillä. Työssä käytettävät kuormitusyhdistelmät ja osavarmuuskertoimet löytyvät Eurokoodista SFS-EN-1990.

6.6 Luodun laskentapohjan soveltaminen tutkimuskohteeseen

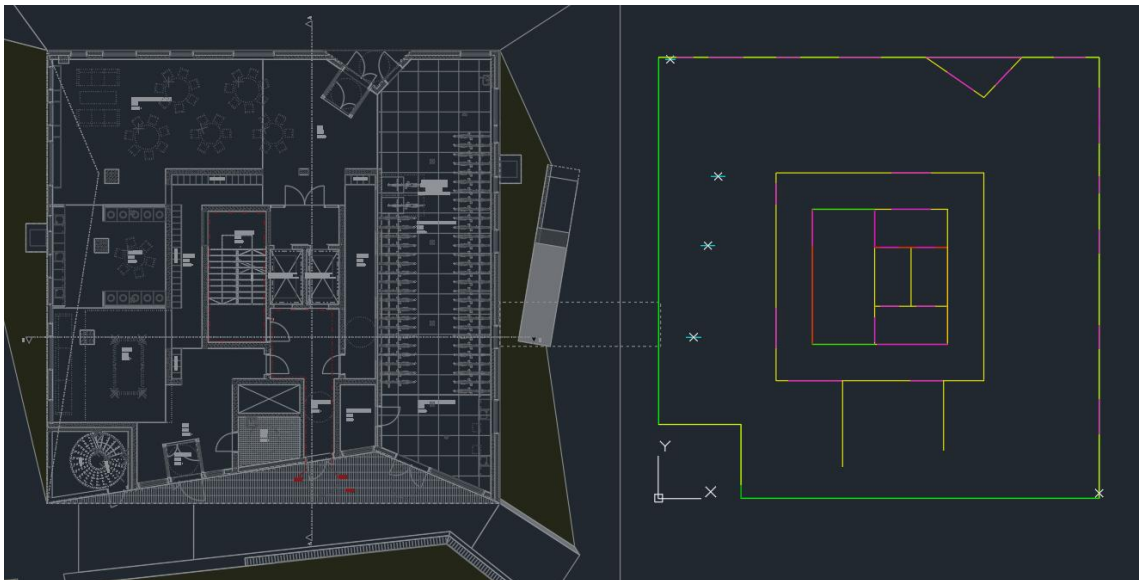
Seuraavaksi sovelletaan kappaleessa 5 esitettyä laskentapohjaa edellä esitettyyn kohteeseen. Laskentapohjalla saatuja tuloksia on esitetty kappaleessa 7. Lisäksi on suoritettu vertailua muiden laskentamenetelmien tuloksiin.

6.6.1 Parametrinen mallin luominen

Tutkimuskohteen parametrinen malli muodostetaan rakennuksen pohjapiirustuksen perusteella, muodostamalla kyseisistä pohjapiirustuksista kuvien 52-56 mukaiset dwg-tiedostot Rhinoon. Tiedostoihin mallinnetaan kantavat linjat sekä portaiden kuormituksia edustavat lisäviivakuormat. Lisäksi mallinnetaan pohjois- ja itäjulkisivujen kantavaan ulkoseinään julkisivukuvun mukaisesti ikkunoiden paikat ja leveydet.

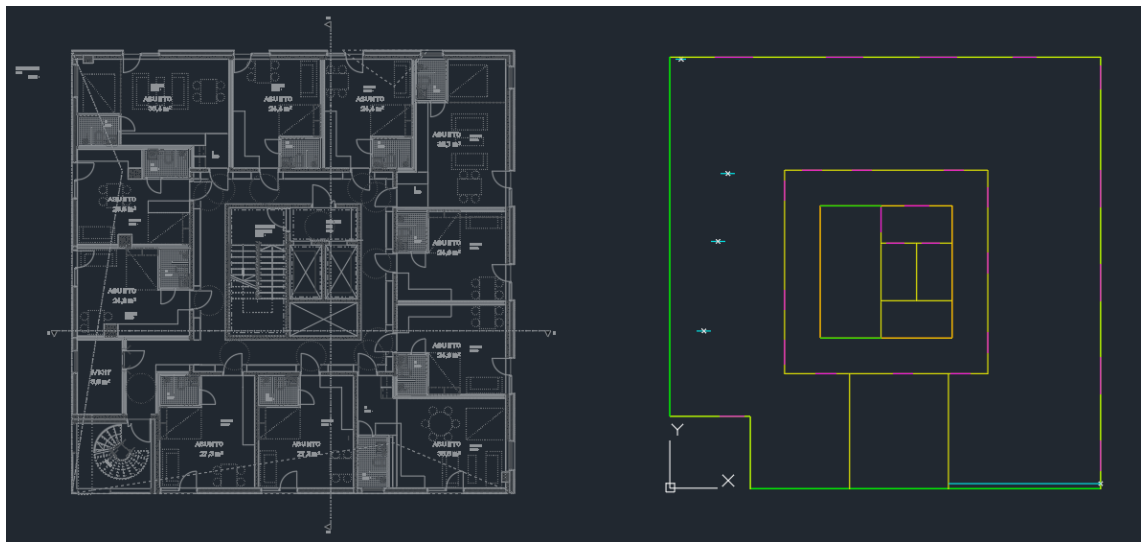


Kuva 52. Kellarin pohjapiirustuksen mukaan luotu dwg-tiedosto.

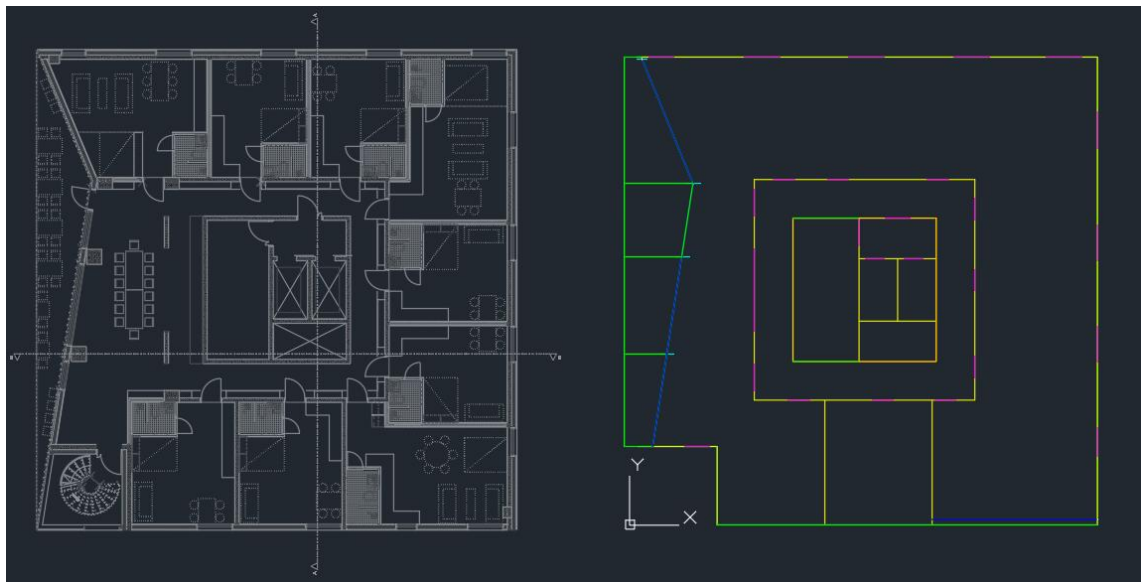


Kuva 53. Ensimmäisen kerroksen pohjapiirustuksen mukaan luotu dwg-tiedosto.

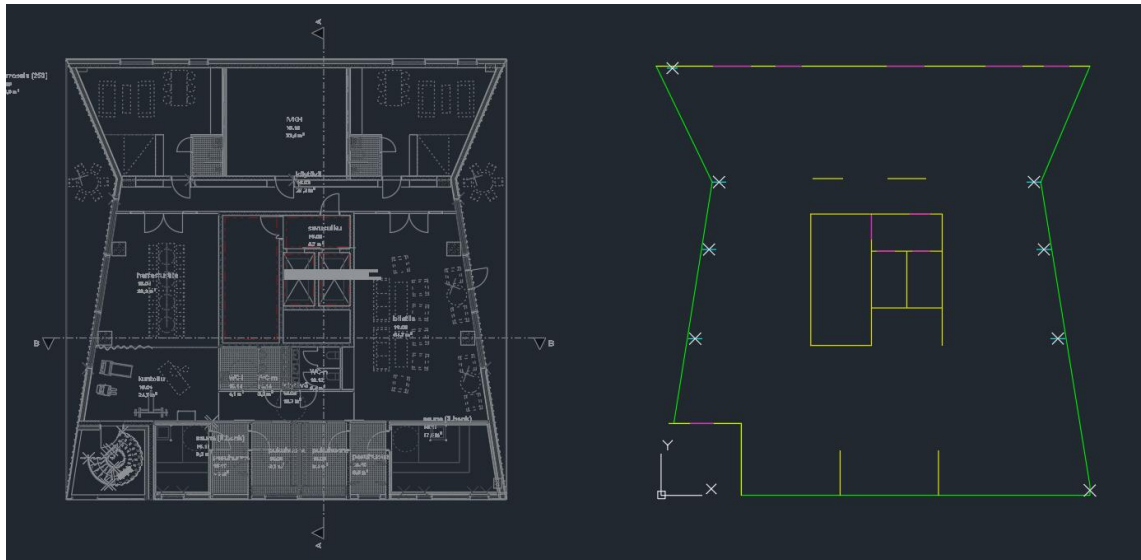
Seuraavaksi mallinnetaan 2-7 kerroksen pohjapiirustusten mukaan kuvassa 54 näkyvä dwg-tiedosto. Viimeisenä mallinnetaan 8-20 kerrosten pohjapiirustusten perusteella kuvissa 54 ja 55 näkyvät dwg-tiedostot. Kerrosten 8-19 ulokeparvekelaatat mallinnetaan jokainen laatta erikseen, jotta niiden välinen ristiin kantavuus saadaan eliminoidua. Kuvien mallinnusten jälkeen tiedostot tuodaan laskentapohjaan.



Kuva 54. 2-4-6- kerrosten pohjapiirustusten mukaan luotu dwg-tiedosto.



Kuva 55. 8-19 kerrosten parittomien kerrosten pohjapiirustusten mukaan luotu dwg-tiedosto.



Kuva 56. 20 kerrosten kerroksen pohjapiirustuksen mukaan luotu dwg-tiedosto.

6.6.2 Lähtötiedot ja perusoletukset

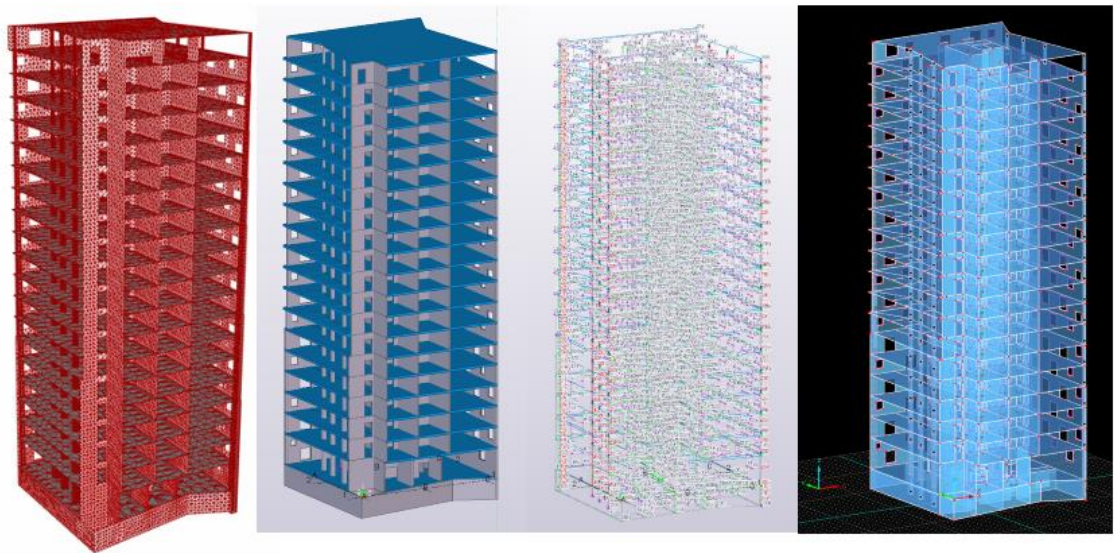
Lähtöparametreina käytetään kohdassa 6.5 lueteltuja arvoja ja kuormituksia. Lisäksi käytetään seuraavia arvoja ja määritelmiä:

- Kerroskorkeus ensimmäisessä kerroksessa 4500 mm
- Kerroskorkeus 2-20 kerroksissa 3000 mm
- Välipohjan paksuutena käytetään 310 mm, johon on mukaan luettu pintavalu.
- Ulokeparvekkeiden palkit ovat yksiaukkoisia
- Pilarit ovat yksikerrospilareita
- Pilareiden materiaali C30/37
- Seinien materiaali C30/37
- Palkkien materiaali C30/37
- Pilareilla käytetään varmuutta 80 %
- Seinillä käytetään varmuutta 60 %.
- Elementtiverkon tiheys 0.5m

Pilarit välittävät vain pystyvoimia ollessaan nivelellisesti kiinnitettyjä. Elementtiverkon tiheydeksi valittiin 0.5m järkevän laskenta-ajan vuoksi. Ikkunoiden koot määritettiin arkkitehdin julkisivukuvista sekä kerrosten pohjapiirustuksista. Rakenneosien betonilaaduksi valittiin yleisesti betonirakenteille käytettävät minimilaadut yllä olevan listan mukaisesti.

6.6.3 Parametrinen malli

Lähtötietojen syöttämisen jälkeen suoritetaan laskenta, jonka lopputuloksena on kuvan 57 mukainen parametrinen malli. Laskenta-aikaan vaikuttaa huomattavasti elementtiverkon tiheys sekä kerrosluku. Tutkimuskohteen elementtiverkon tiheydeksi valittiin kyseisessä laskennassa edellä mainittu 0.5m, jotta laskenta-ajasta saatiin järkevä. Lisäksi kohdassa 5.3.8 esitelty tulosten pyöristäminen johti siihen, ettei pienemmällä verkolla saatu juurikaan tarkempia tuloksia. Parametrisen laskennan tuloksia on esitetty kappaleessa 7. Tutkimuskohteen parametrinen malli vietiin Teklaan kohdan 4.3 ohjelmakomponenttien avulla. Lisäksi mallista luotiin kuvan 57 mukainen analyysimalli, joka vietiin lopulta RFEMiin.



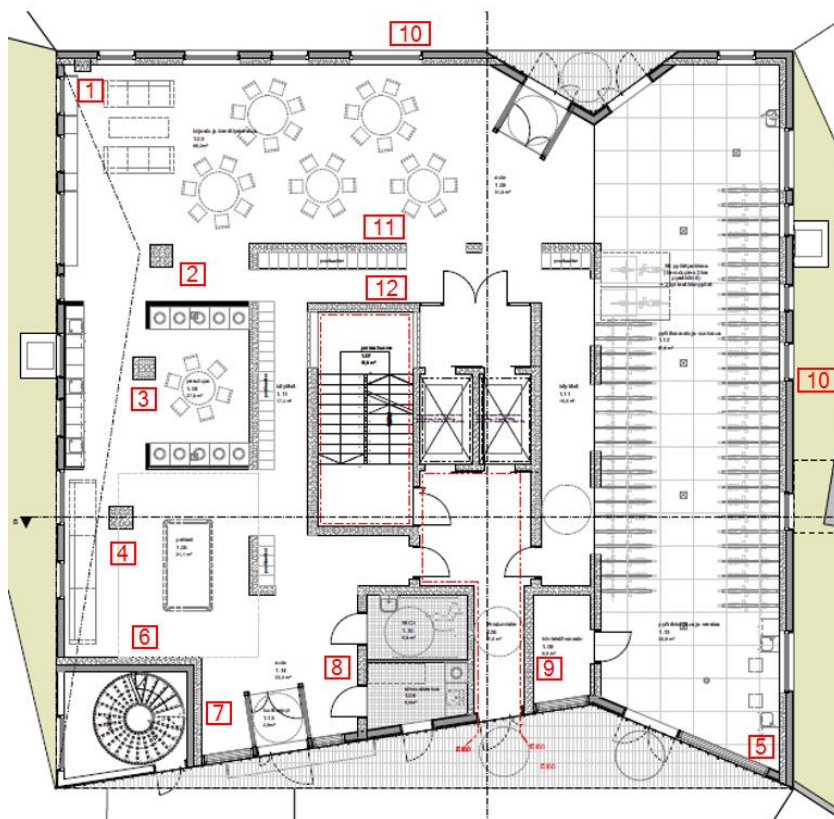
Kuva 57. Tutkimuskohteen parametrinen malli Rhinon ja Teklan näkymässä sekä rakennemallista luotu analyysi- ja RFEM-laskentamalli.

7 TUTKIMUKSEN TULOSTEN ANALYYSINTI

Tässä kappaleessa esitetään tutkimusosin tuloksia parametriseen suunnitteluun osalta ja verrataan tuloksia toisen numeerisen mallin laskentatuloksiin perustuskuormien ja siirtymien osalta. Laskentapohjalla saatuja rakenteiden nimellismittoja verrataan käsinlaskennan tuloksiin. Lisäksi pohditaan parametriseen suunnitteluun liittyviä ongelmia ja puutteellisuuksia. Rakenteiden nimellismittojen määrittelemiseksi käytettiin Eurokoodin mukaisia murtorajatilan kuormitusyhdistelmiä. Perustuskuormia vertailtiin pelkästään rakennusta kuormittavien pystykuormien vaikutuksesta. Siirtymät määritettiin karakterististen vaakavoimien avulla.

7.1 Tarkasteltavat rakenneosat

Tutkimuskohteen tarkasteltaviksi rakenneosiksi valittiin kaikki ensimmäisen kerroksen kantavat rakenneosat. Taulukoissa 3, 4 ja 5 on listattu kuvan 58 mukaisten rakenteiden alustavat nimellismitat sekä perustuskuormat laskentapohjan ja vertailulaskelmien mukaan.



Kuva 58. Ensimmäisen kerroksen tarkasteltavat rakenneosat numeroituna.

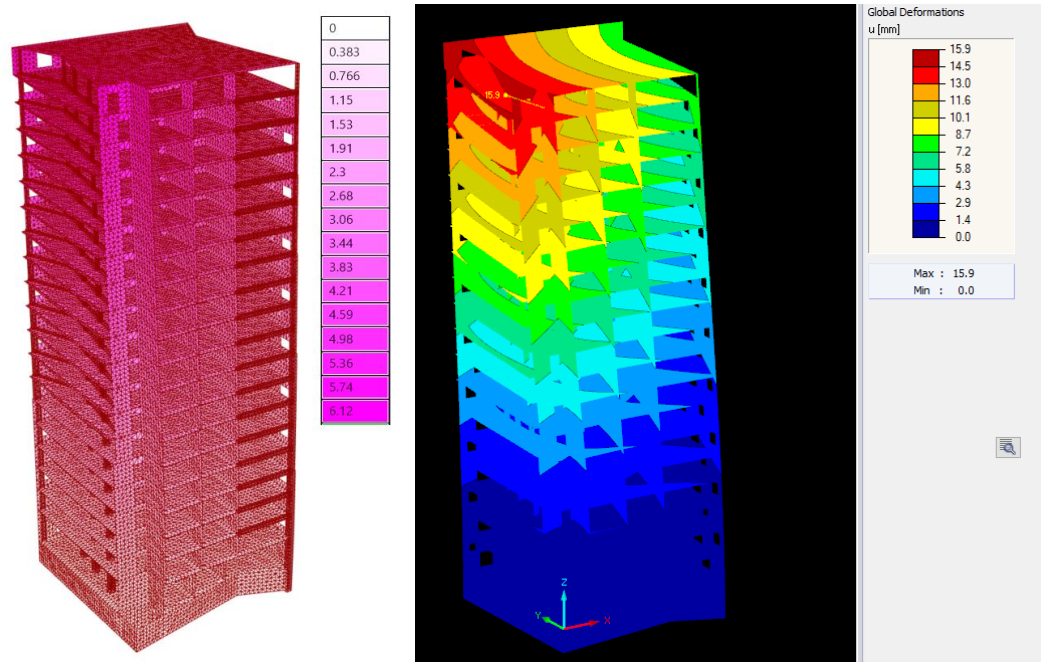
Perustuskuormat määritettiin vertailun vuoksi molemmilla malleilla karakterististen kuormitusten suhteen. Taulukossa 4 on listattu rakenneosakohtaisesti perustuskuormien arvot. Taulukossa on lisäksi listattuna perustuskuormien kokonaisresultantit pystysuunnassa. Seinien kuormitukset on tarkasteltu tukireaktioiden keskiarvoina. Lisäksi taulukossa 5 on listattu pysyvistä ja hyötykuormista sekä tuulikuormista aiheutuvat vaakavoimat perustustuksille.

Taulukko 4. Karakteristiset perustuskuormat (pysyvät + hyöty).

Rakenneosa	Perustuskuorma Karamba [kN]/ [kN/m]	Perustuskuorma RFEM [kN]/ [kN/m]
Pilari 1	1392	633
Pilari 2	2903	3285
Pilari 3	2948	3040
Pilari 4	2776	2985
Pilari 5	1819	640
Seinä 6	599	675
Seinä 7	441	593
Seinä 8	1473	1431
Seinä 9	1400	1460
Ulkoseinät 10	612	695
Keskikuilu ulompi 11	950	1062
Keskikuilu sisempi 12	627	669
Kokonaisresultantti	121093	124038

Taulukko 5. Karakteristiset perustuskuormat vaakavoimista [kN]

Suunta	+y		-y		+x		-x	
FEM	Karamba	RFEM	Karamba	RFEM	Karamba	RFEM	Karamba	RFEM
Pysyvät kuormat	590	620	590	620	590	620	590	620
Hyötykuormat	110	104	110	104	110	104	110	104
Tuulikuorma	1527	1437	1771	1426	1552	1424	1771	1416
Kokonaisresultantti	2227	2161	2170	2150	2252	2148	2471	2140



Kuva 60. Siirtymäkuvaajat tuulensuunnan +y mukaan.

Taulukko 6. Vaakasiirtymät tuulen suunnan mukaan.

Tuulen suunta	Kokonaissiirtymä laskentapohjalla [mm]	Kokonaissiirtymä RFEM [mm]
+y	6.1	15.9
-y	6.8	15.7
+x	5.4	13.9
-x	6.7	13.7

7.2 Tulosten vertailu ja analysointi

Laskentapohjan antamiin tuloksiin vaikuttaa oleellisesti rakenneosissa käytettävät varmuuskertoimet. Pilarit 1-3 näyttävät laskentapohjan antamien tulosten mukaan lähes samalta mitä vertailulaskennassa määritettiin. Laskentapohja mitoittaa pilarit 4 ja 5 hieman yli, sillä numeerinen laskentamalli jakaa kuormituksia virheellisesti pilarin ollessa seinälinjalla tai seinän läheisyydessä. Tämä johtuu numeerisen mallintamisen ominaisuudesta jakaa kuormituksia jäykkyyksien suhteessa rakenteille. Pilarin paksuus on seinän kohdalla moninkertainen seinään verrattuna, joten suurin osa alueen kuormituksista kohdistuvat pilarille. Virhettä voidaan vähentää pienentämällä kyseisen pilarin jäykkyyttä.

Seinien osittainen suuri kokoero johtuu numeerisen mallintamisen ongelmasta, jossa rakenteiden kuormat lähtevät ajautumaan vierekkäisille rakenteille jäykkyyksien suhteessa. Todellisuudessa kuormitukset siirtyvät vesikatolta perustuksille suorinta reittiä alas. Ongelma ilmenee voimakkaasti ensimmäisen kerroksen seinien 8 ja 9 kohdalla, joiden kuormitukset ovat huomattavasti todellisia kuormituksia pienemmät. Ylemmissä kerroksissa seinälinjat 8 ja 9 jatkuvat ulkoseinälinjaan saakka, jolloin ensimmäisen kerroksen seinät kantavat ulokkeilta tulevat kuormat perustuksille. Numeerinen malli ohjaa suuren osan kuormituksista keskikuilulle, jotka näkyvät tuloksissa selvästi voimien tasaisempana jakautumisena. Seinille 8 ja 9 määritettiin käsin laskemalla paksuudeksi 400 mm.

Ikkunapalkkien leikkauskestävyyden vuoksi ulkoseinien rakennepaksuutta piti kasvattaa kerroksissa 1-8. Raudoitukseksi tarvittiin nelileikkeinen hakarauditus. Ulkoseinät (10) määritettiin ensimmäisessä kerroksessa 300 mm ja ylemmissä kerroksissa kerrokseen 8 saakka rakennepaksuudeltaan 250 mm. Ulomman keskikuilun seinien (11) paksuuksia kasvatettiin vertailulaskennassa 300 mm paksuuteen, jotta ovipalkkien leikkausvoimia saatiin pienennettyä.

Perustuskuormat näyttävät pilareiden 2-4 kohdalla kutakuinkin samalta. Pilareiden 1 ja 5 kohdalla eroavaisuus tuloksissa on huomattava. Ero tuloksissa johtuu edellä mainitusta numeerisen mallin ominaisuudesta jakaa kuormituksia jäykkyyksien suhteessa rakenteille. Laskentapohjan iteraation edetessä pilarille kohdistuu jokaisen iteraatiokierroksen jälkeen enemmän kuormaan aina kun sen poikkileikkaus kasvaa. Määrittämällä samat poikkileikkausominaisuudet vertailulaskennan numeeriseen malliin, saataisiin tuloksista yhteneviä myös kyseisten rakenteiden osalta. Seinien perustuskuormat eroavat laskentojen välillä. Eroavaisuudet johtuvat seinien kokoluokista, sillä RFEM-laskentamallin seinät on mallinnettu isommilla profileilla, joten pelkästään niiden omapainot nostavat perustuskuormien arvoja seinälinjoilla.

Perustuskuormien arvot vaakavoimista näyttävät lähes samalta pysyvien ja hyötykuormien aiheuttamista vaakavoimista tarkasteltavien ohjelmien välillä. Eroavaisuuksia löytyy tuulikuormien osalta. Tämä johtuu kohdassa 6.5 mainitusta tuulikuormien määrittäytavasta. Laskentapohjan tuulikuormitukset on mallinnettu korkeusasemasta riippuvien kuormitusten resultanttina yhtä suurella kuormituksella, joka kerroksessa. Menetelmä ei huomioi korkeusasemasta riippuvaa tuulivoiman jakaumaa

rakennuksen eri korkeuksissa. Taulukosta 4 nähdään kuitenkin, että laskentapohjan kokonaisresultantti on suurempi RFEMin antamiin tuloksiin verrattuna. Voidaan siis todeta, että menetelmä on varman puolella.

Vaakavoimista syntyviä perustuskuormia vertailtiin silmämääräisesti kahden laskentamallin välillä. Tulosten vertailussa havaittiin, että jakaumat rakenneosille olivat lähes samat, mutta eroavaisuuksia löydettiin kuormitusten arvojen välillä. Tämä johtuu osittain edellä mainitusta tuulikuormien määrittelytavasta sekä rakenneosien kokoluokkien eroavaisuuksista.

Siirtymiä tarkasteltiin pelkkien vaakavoimien vaikutuksista, jotta tuloksista saatiin eliminoitua pystysuuntaiset siirtymät eli painuman vaikutus tuloksiin. Pienten siirtyminen perusteella voidaan sanoa, että rakennuksen runko on jäykkä. Siirtymät näyttävät huomattavasti pienemmiltä laskentapohjalla saaduissa tuloksissa. Tämä johtuu osittain tasojen välisten vapautusten puuttumisesta. Tasojen väliset vapautukset jätettiin mallintamatta parametriseen malliin, sillä niiden määrittelemine on Karamballa tutkimuksen tekohetkellä osittain puutteellinen.

Tulosten vertailussa huomataan selkeitä eroja tulosten välillä. Tämä johtuu osittain edellä mainituista ominaisuuksista ja kahden eri numeerisen mallin muodostamisesta. Työssä luotu parametristä suunnittelua hyödyntävä laskentapohja muodostaa elementtimenetelmään perustuvan laskentamallin sekä määrittelee laskentamallissa käytettävien rakenneosien paksuudet. Vertailulaskennan numeerisen mallin rakenneosat on määritetty käsin ja syötetty laskentamalliin manuaalisesti. Mikäli molemmissa laskentamalleissa käytettäisiin yhteneviä rakennepaksuuksia, saataisiin muun muassa perustuskuormien arvoista huomattavasti yhteneväisempiä tuloksia. Algoritmiin sisällytettiin loppuvaiheessa mahdollisuus määritellä seinien paksuudet rakenneosakohtaisesti lähtötiedostossa.

7.3 Parametriseen suunnittelun puutteellisuudet ja ongelmat

Parametriseen suunnitteluun liittyy vielä tiettyjä seikkoja, jonka takia se ei vielä ole rakennesuunnittelussa kokonaisvaltaisesti käytössä. Työn aloituksesta lähtien oli tiedossa tiettyjä ominaisuuksia, jotka rajoittavat parametriseen suunnittelun soveltuvuutta

rakennesuunnittelun tarpeisiin. Työssä luodun laskentapohjan soveltaminen tutkimuskohteeseen toi hyvin esille parametriseen suunnitteluun liittyviä ongelmia.

Grasshopperin suorittama laskenta ei näy käyttäjälle. Tämä osoittautui ongelmaksi varsinkin laajemmilla malleilla. Näkymäikkuna ikään kuin jäätyy ja ilmoitustekstinä näkyy ”not respond” vaikka laskentaa suoritetaan taustalla onnistuneesti. Kyseinen ominaisuus ei ole ongelma kokeneelle käyttäjälle, mutta laskentapohjaa ensimmäistä kertaa käyttävä voi kuvitella ohjelman kaatuneen.

Työssä käytettävät parametriseen suunnitteluun luotu FEM-laskentaohjelma Karamba 3D:n parametrisen laskentamallin tulosten tarkastelu isoilla laskentamalleilla on Grasshopperin ja Rhinon puolella huomattavasti kömpelömpää kuin vastaavissa FEM-laskentaohjelmissa. Algoritmin koekäytössä havaittiin, että rakenneosien mitoituksen kannalta oleellisia voimasuureita on vaikea poimia parametrisestä mallista. Esimerkkinä julkisivuseinien ja keskikäytävän aukkopalkkien suuret leikkausvoimarasitukset. Lisäksi rakenneosien väliset vapautukset, seinien jatkuvat tuet sekä tasojen viivakuormat ovat huomattavasti haasteellisempaa mallintaa Karamballa kuin vastaavilla FEM-laskentaohjelmilla.

Edellä mainitut ominaisuudet ovat seurausta käytetyn FEM-laskentaohjelman rajoittuneisuudesta. On olennaista huomata, että tulosten vertailussa havaitut eroavaisuudet ja ongelmat eivät johdu yksistään työssä käytettävän FEM-laskentaohjelman ominaisuuksista vaan kyseiset ongelmat ovat yleisesti numeerisen mallintamisen ongelmia. Tämän vuoksi numeerisen mallintamisen tuloksiin on aina suhtauduttava kriittisesti ja tulosten tueksi on hyvä suorittaa verifiointilaskentaa erilaisin menetelmin.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Parametrinen suunnittelu nopeuttaa rakennushankkeen luonnossuunnitteluprosessia, suorittamalla rakenteiden esivalintaa suunnittelijan puolesta. Lisäksi laskenta- ja rakennemallin geometrian mallintamiseen kuluu huomattavasti vähemmän aikaa. Parametrisella suunnittelulla saadut tulokset vaativat aina rakennesuunnittelijan kriittisen tarkastelun. Erityistä huomiota on kiinnitettävä leikkausrasitettuihin rakenteisiin sekä kerroksittain epäjatkuviin rakenteisiin kuten seinämäisiin palkkeihin ja ulokerakenteisiin. Lisäksi seinälinjojen läheisyydessä sijaitsevien pilareiden kokoluokkiin on syytä suhtautua kriittisesti. Työssä luotu laskentapohja ei yksistään toimi pelkällä arkkitehdin pohjapiirustuksella vaan tästä laadittava lähtötietotiedosto on osattava muodostaa suunnittelijan toimesta. Tämän vuoksi IFC-mallin käyttäminen lähtöparametrina suunnittelulle hylättiin alkuvaiheessa, sillä arkkitehdin luoma malli ei vastaa ominaisuuksiltaan rakennesuunnittelijan laskentamallin vaatimuksia muun muassa mallinnustarkkuuksien osalta. Lisäksi käytettäessä IFC-mallia lähtötietona, geometriaan tehtävät muutokset jouduttaisiin tekemään IFC-malliin suunnittelijan tai arkkitehdin toimesta.

Tutkijan kokemattomuus perinteisestä sekä visuaalisesta ohjelmakoodin kirjoittamisesta vaikutti koodin ja luomisprosessiin olennaisesti. Teoriaosuus antoi hyvät lähtökohdat visuaalisen ohjelmakoodin kirjoittamiseen. Parametrisellä suunnittelulla on paljon potentiaalia, jota ei vielä täysin ole hyödynnetty rakennesuunnittelussa. Alan ohjelmistot kehittyvät kovaa vauhtia, samalla kun tieto ja osaaminen aihealueesta laajenevat. Parametriset suunnittelumenetelmät ovat sekä tämän hetken, että tulevaisuuden suunnittelijoiden työkaluja.

Parametrinen malli on linkitettävissä muihin mallinnus- ja laskentaohjelmiin ohjelmakomponenttien avulla. Parametrisen mallin linkitys Teklaan primäärirakenteiden osalta on suoraviivaista ja helposti toteutettavissa siihen luoduilla työkaluilla. Teklan käyttöliittymä voidaan käytännössä rakentaa kokonaan Grasshopperin puolelle siihen luoduilla työkaluilla. Lisäksi parametrinen malli voidaan linkittää muihin FEM-laskentaohjelmiin jatkojalostusta varten. Työssä käytettävän parametrisen FEM-laskentaohjelman Karamban luoman mallin linkitys RFEMiin toimii tutkimuksen tekohetkellä hyvin pilareiden ja palkkien kohdalla, mutta tasojen ja seinien osalta linkitys on puutteellinen. Parametrisen mallin linkitykseen Karamban ja RFEMin välille löytyi

myös muita kolmannen osapuolen kehittämiä ohjelmakomponentteja, joiden avulla saatiin yksinkertaisia tasoja linkitettyä ohjelmistojen välillä, mutta niiden toiminta todettiin vielä hieman puutteelliseksi. Ohjelmarajapinnat kehittyvät hyvää vauhtia ja linkitys tulee todennäköisesti parantumaan tulevaisuudessa. Grasshopperin parametrinen laskentamallin geometrian linkittämiseen soveltuu työn tekohetkellä paremmin Teklan puolella luotava analyysimalli, joka voidaan linkittää laskentaohjelmiin kuten RFEMiin. Parametrinen malli linkitetään ensin Teklaan, jonka ympäristössä luodaan analyysimalli, joka viedään lopulta RFEMiin.

Edellä mainittujen seikkojen perustella voidaan todeta, että parametriset suunnittelumenetelmät soveltuvat luonnosvaiheessa rakenteiden alustavaan mitoituseseen sekä rakenne- ja laskentamallien lähtögeometrian luontiin. Parametrinen suunnittelu soveltuu hyvin kohteisiin, joissa esiintyy paljon toistuvuutta.

9 YHTEENVETO

Työssä tutkittiin parametrinen suunnittelun hyödynnettävyyttä teräsbetonisten runkojen luonnossuunnittelussa. Työn tavoitteena oli luoda työkalu luonnossuunnitteluvaiheeseen eri runkoratkaisujen nopeaan vertailuun ja rakenteiden alustavaan mitoitukseen. Työssä määriteltujen mitoitusehtojen perusteella luotiin algoritmiavusteisesti laskentapohja parametrinen mallin luontiin. Laskentapohja mahdollistaa nopean rakenteiden alustavan mitoituksen sekä havainnollistaa jäykistävien rakenteiden toimivuutta luonnossuunnitteluvaiheessa. Käyttäjän suorittama alkuarvaus käytettävien rakenneosien paksuuksista hankkeen alkuvaiheessa on ohitettu laskentapohjan suorittaman esivalinnan ansiosta. Laskentapohja mahdollistaa myös perustuskuormien karkean määrittelymisen luonnossuunnitteluvaiheessa. Lisäksi rakenteesta saadaan hyvin pienellä vaivalla raakamalli, jota voidaan jatkojalostaa Teklan puolella.

Tässä työssä keskityttiin rakenteiden alustavaan mitoitukseen. Rakenneosien laajempi mitoitus luonnossuunnitteluvaiheessa ei ole tarpeellista eikä kannattavaa. Lisäksi pidennettäisiin laskenta-aikaa, eikä eri runkoratkaisujen nopea vertailu enää toimisi yhtä jouhevasti. Jatkotutkimuksena voisi tutkia rakenneosien syvempää mitoitusta parametrillä suunnittelulla. Eräs vaihtoehto rakenneosien laajempaan mitoitukseen on excel-laskentapohjien sisällyttäminen Grasshopperin ympäristöön. Grasshopperin ja excel-tiedostojen välillä voidaan siirtää informaatiota esimerkiksi lähtögeometrian tai yksittäisen rakenneosan mitoitukseen tarvittavien lähtötietojen muodossa. Excel-tiedostojen laskenta voidaan myös sisällyttää Grasshopperiin skriptaamalla. Lisäksi rakennemallia voisi laajentaa myös Teklan puolelle detaljoinnin osalta. Rakenteiden alustavaa mitoitusta voisi laajentaa myös välipohjien mitoitukseen.

Työssä saatiin tärkeää tietoa parametrinen suunnittelun hyödyntämisestä rakennesuunnittelussa. Yhtenä työn tavoitteena oli luoda helppokäyttöisiä pohjia muiden suunnittelijoiden käytettäväksi. Työn yhteydessä luotiin erilliset käyttöohjeet ohjelmistojen asentamiseen sekä pohjien käyttöön. Lisäksi mitoituspohjaa testattiin toisen suunnittelijan toimesta, jotta käyttöliittymästä saatiin muokattua selkeä kokonaisuus. Työssä luotu algoritmi toimii hyvänä pohjana seuraaville hankkeille ja jatkotutkimuksille. Laskentapohjan kehittäminen sekä parametrinen suunnittelun soveltaminen muiden hankkeiden tarpeisiin jatkuu työn ohessa.

10 LÄHDELUETTELO

BES, 1988. BES-järjestelmän rakenteita koskeva suositus 1988: Julkaisu 1. Helsinki: SBK Suomen betoniteollisuuden keskusjärjestö.

Betoniteollisuus ry, 2010a. Jäykistysjärjestelmät. [verkkodokumentti]. Saatavissa: www.elementtisuunnittelu.fi/Download/22083/Jäykistysjärjestelmät.pdf [viitattu 9.1.2019].

Betoniteollisuus ry, 2010b. Elementtirakentamisen-historia. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/valmisosarakentaminen/elementtirakentamisen-historia#> [viitattu 8.1.2019].

Betoniteollisuus ry, 2010c. BES 2010 uutiskirje. [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/09/BET1003_54-57.pdf [viitattu 8.1.2019].

Betoniteollisuus ry, 2010d. Pilareiden mittasuositus. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/runkorakenteet/pilarit/pilareiden-mittasuositus> [viitattu 8.1.2019].

Betoniteollisuus ry, 2010e. Suorakaidepalkit. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/runkorakenteet/palkit/suorakaidepalkit> [viitattu 8.1.2019].

Betoniteollisuus ry, 2010f. Laattarakenteet. [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi/runkorakenteet/laatat> [viitattu 8.1.2019].

Betoniteollisuus ry, 2019. Paikallavalurakentaminen, yleistä [verkkodokumentti]. Helsinki: Betoniteollisuus ry. Saatavissa: <http://www.valmisbetoni.fi/paikallavalurakentaminen/yleista> [viitattu 7.1.2019].

Forsman, J. 2018. Olympiastadionin teräskatosten algoritmiavusteinen suunnitteluprosessi. [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Paavo Vähänen. Lähetetty 30.1.2019 klo. 14:55. (GMT +0200).

Davis, D, 2013. Modelled on Software Engineering: Flexible Parametric Models in the Practice of Architecture, RMIT University. 122 s.

Erkkilä, S, 2017. Algoritmiavusteisen suunnittelun hyödyntäminen betonielementtirakenteiden suunnittelussa. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan osasto, Tampere. 98+5 s.

Grasshopper-Tekla Live Link. Trimble Solutions Corporation. 2018. Saatavissa: https://teklastructures.support.tekla.com/not-version-specific/en/ext_grasshopperteklalink [viitattu 10.1.2019].

Jaakkola, T, 2011. Monikerrosrungon jäykistävien elementtirakenteiden numeerisen mallintamisen ohjeistus. Diplomityö, Oulun yliopisto, Konetekniikan osasto. Oulu. 144+35 s.

Karamba 3D User manual (version 1.3.1), 2018. August 2018. Clemens Preisinger.

Leskelä, M. V. (2008). by210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry, 711 s. ISBN 978-952-5075-96-0.

Lumijärvi, J. (2018). Elementtimenetelmät 1, Johdanto. Luentomateriaali, Oulun yliopisto, Oulu.

Mäenpää, J, 2018. Algorithm-aided structural engineering of steel framed warehouse. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan osasto, Tampere. 55+72 s.

RIL 201-2008: Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y., 190 s. ISBN 978-951-758-516-3.

Rakennesuunnittelun tehtäväluettelo RAK 12. 2012. RAKLI ry.

SFS-EN 1990 + A1 + AC, 2006. Eurokoodi: Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto, 186 s.

SFS-EN 1991-1-1 (2005). Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset

kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 73 s.

SFS-EN 1991-1-4, 2011. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 256 s.

SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 2015. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu, osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, 2. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 194 + 26 s.

Suomen Betoniyhdistys, 2009. BY 60 – Suunnitteluohje EC2 osat 1-1 ja 1-2. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys ry, 57 s. ISBN 978-952-67169-0-9.

Tanska, T. & Österlund, T. (2014). Algoritmit puurakenteissa: menetelmät, mahdollisuudet ja tuotanto, B 32, 1st ed. DigiWoodLab, Oulun yliopisto, Arkkitehtuurin tiedekunta.

Taranath, Bungale S. 2010. Reinforced Concrete Design of Tall Buildings. USA. CRC Press. 923 s.

Vänttilä, J. (2016). Rakennuksen runko, rungon rakenneosat ja runkojärjestelmät. Luentomateriaali, Oulun yliopisto, Oulu.